
DIPLOMARBEIT

Herr B.Eng.
Christian Mannigel

**Ermittlung der
Eigenspannungsverteilung
nach dem Festwalzen von
austenitisch-ferritischem
Gusseisen mit Kugelgraphit
(ADI)**

Mittweida, 2014

DIPLOMARBEIT

Ermittlung der Eigenspannungsverteilung nach dem Festwalzen von austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)

Autor:

Herr B.Eng.

Christian Mannigel

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

MB11w1-A

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel

Einreichung:

Mittweida, 14.03.2014

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 30.09.2014

Engineering Faculty

DIPLOMA THESIS

Identification of the residual stress distribution after the fi- nal expanding of austempered ductile iron (ADI)

author:

Mr. B.Eng.

Christian Mannigel

course of studies:

Mechanical Engineering

seminar group:

MB11w1-A

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn

second examiner:

Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel

submission:

Mittweida, 14.03.2014

defence/ evaluation:

Mittweida, 30.09.2014

Bibliografische Beschreibung:

Mannigel, Christian:

Ermittlung der Eigenspannungsverteilung nach dem Festwalzen von austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)–2014. 13, 88, 20 S.
Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Diplomarbeit, 2014

Referat:

In der vorliegenden Diplomarbeit wird sich mit der Thematik der Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren auseinandergesetzt. Dabei soll eine Systematik zur Eigenspannungsmessung entwickelt werden. Anschließend sind die Eigenspannungen an Referenz-ADI-Proben zu ermitteln. Im darauffolgenden Fertigungsschritt wird durch Festwalzen der Oberfläche ein veränderter Spannungsverlauf im Material eingestellt. Anschließend sind die unterschiedlichen Spannungsverläufe, welche durch verschiedene Festwalzparameter hervorgerufen worden sind, zu messen und auszuwerten.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn und Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel für die sehr gute Unterstützung und Betreuung während der Diplomarbeit bedanken.

Weiterhin danke ich Dipl.-Ing. Udo Hofbauer von der Vishay Precision Group für die ausgezeichnete Beratung und Unterstützung bei der Auswahl von Dehnungsmessstreifen, der Eigenspannungsmessung sowie der Auswertung der Messdaten.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Hohmann und Herrn Süchting für die mechanische Fertigung und Bearbeitung der ADI-Proben bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden bedanken, die mir in dieser Zeit hilfreich zur Seite standen und so den Rücken freigehalten haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichenverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziele und Aufgabenstellung.....	2
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Definition Eigenspannungen	3
2.2 Entstehung von Eigenspannungen	3
2.3 Einteilung von Eigenspannungen.....	5
2.4 Abbau von Eigenspannungen	7
2.5 Verfahren der Eigenspannungsmessung.....	9
2.5.1 Experimentelle Eigenspannungsermittlung	9
2.5.2 Zerstörungsfreie Verfahren.....	10
2.5.3 Teilzerstörende Verfahren	12
2.5.3.1 Ring-Kern-Verfahren.....	13
2.5.3.2 Härte-Verfahren	14
2.5.4 Zerstörende Verfahren	15
2.5.4.1 Biegemethoden.....	15
2.5.4.2 Ausschneiden	16
2.5.4.3 Ausbohr- und Abdrehverfahren.....	16
3 Die Bohrlochmethode	17
3.1 Allgemeines	17
3.2 Versuchsdurchführung DMS-Applikation	19
3.2.1 Versuchsvorbereitung.....	19
3.2.2 Dehnungsmessstreifen.....	27
3.2.3 DMS mit P3 Strain Indicator verbinden.....	33
3.2.4 Konfiguration P3 Strain Indicator	38
3.3 Aufbau der Bohrvorrichtung	41

3.3.1	Montage der Bohrvorrichtung	41
3.3.2	Montage der Druckluftversorgung	44
3.3.3	Betriebsdruck einstellen	46
3.4	Versuchsdurchführung Fräsvorgang	47
3.4.1	Markieren und Ausrichten der Bohrvorrichtung	47
3.4.2	Vorbereitung des Fräsvorganges	48
3.4.3	Der Fräsvorgang.....	51
3.5	Versuchsauswertung.....	53
3.5.1	Die Integralmethode	53
3.5.2	Messwerte importieren und auswerten.....	54
4	Festwalzen der Proben.....	60
4.1	Allgemeines	60
4.2	Werkzeuge.....	61
4.3	Geometrie der Prüfkörper	63
4.4	Versuchsanordnung und -durchführung.....	65
4.4.1	Versuchsanordnung	65
4.4.2	Versuchsdurchführung Festwalzen	67
5	Ermittlung der Eigenspannungstiefenverläufe	69
5.1	Allgemeines	69
5.2	Einfluss des Schmirelins der Oberfläche	70
5.3	Referenzprobe	72
5.4	Messungen bei verschiedenen Kräften	75
5.4.1	Versuche mit Festwalzkraft 250 N	76
5.4.2	Versuche mit Festwalzkraft 500 N	77
5.4.3	Versuche mit Festwalzkraft 750 N	78
5.4.4	Versuche mit Festwalzkraft 1000 N	80
5.4.5	Vergleich der unterschiedlichen Festwalzkräfte	81
5.5	Messungen bei verschiedenen Spurbreiten	83
6	Zusammenfassung	87
	Literaturverzeichnis	89
	Anhangsverzeichnis	92
	Anhang.....	93
	Selbstständigkeitserklärung	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spannungsverteilung infolge schneller Abkühlung	4
Abbildung 2: Eigenspannung beim Biegen	5
Abbildung 3: Überlagerung der Eigenspannungen	6
Abbildung 4: Ausschnitt des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms.....	7
Abbildung 5: Temperatur-Zeit-Verlauf beim Spannungsarmglühen	8
Abbildung 6: BRAGGsche Reflexion.....	11
Abbildung 7: Strahlengang beim DEYBE-SCHERRER-Verfahren	12
Abbildung 8: DMS für Ring-Kern-Verfahren.....	13
Abbildung 9: Bohr-und Messanordnung beim Ring-Kern-Verfahren	14
Abbildung 10: Probenreinigung mit GC-6 Isopropyl-Alkohol.....	22
Abbildung 11: Reinigung der Glasplatte mit M-Prep Neutralizer 5A und GAZE-Tupfer	22
Abbildung 12: M-Prep Conditioner A und SPC-2 Silicium-Schmirgelpapier 320-er Körnung.....	23
Abbildung 13: Markierungslinien mit DMS	25
Abbildung 14: Reinigung der Überreste der Markierungslinien	26
Abbildung 15: Hauptbestandteile eines DMS zur Spannungsanalyse.....	28
Abbildung 16: Dehnungsmessstreifen und Applikationsklebeband.....	30
Abbildung 17: Positionierung vor dem Klebevorgang	31
Abbildung 18: Auftragen des M-Bond 200 Katalysators	31
Abbildung 19: Auftragen des M-Bond 200 Klebstoffes	32
Abbildung 20: Dehnungsmessstreifen mit Probe verbinden	32
Abbildung 21: Anpressen des DMS mit festem Daumendruck.....	33
Abbildung 22: Entfernen des Applikationsklebebandes	33
Abbildung 23: Aufsplittung des PVC-Flachbandkabels.....	34
Abbildung 24: Kabelende zum Dehnungsmessstreifen	35
Abbildung 25: Verbindung PVC-Flachbandkabel mit Dehnungsmessstreifen.....	35
Abbildung 26: DMS mit Entlastungsschleufe	36
Abbildung 27: Kanalbelegung am DMS	36
Abbildung 28: Detailaufnahme Kabelanschluss am P3 Strain Indicator.....	37
Abbildung 29: Anschluss des DMS an den P3 Strain Indicator	37
Abbildung 30: 3-Leiter-Viertelbrückenschaltung	38
Abbildung 31: Höhenjustierung der Bohrvorrichtung	41
Abbildung 32: Montage der Beleuchtung und des Anti-Rotations-Adapters.....	41
Abbildung 33: Aufsetzen der Stellschraube	42
Abbildung 34: Montage des Fräasers	42
Abbildung 35: Turbine mit Nylonring einsetzen	43
Abbildung 36: Montage der Federeinheit	43
Abbildung 37: Kugelhahn für Druckluftzufuhr	44

Abbildung 38: Luftaufbereitungseinheit mit Druckluftzugang.....	44
Abbildung 39: Luftaufbereitungseinheit mit Druckluftabgang.....	45
Abbildung 40: Fußpedal	45
Abbildung 41: Verbindung Druckluftzufuhr mit Turbine	46
Abbildung 42: Drucklufthauptventil.....	46
Abbildung 43: Auflegen der Bohrvorrichtungsschablone	47
Abbildung 44: Feinjustierung der Bohrvorrichtung	48
Abbildung 45: 1,6 mm-Fräser.....	48
Abbildung 46: Welle für Bohrmaschinenantrieb	49
Abbildung 47: Nullpunktsetzung.....	50
Abbildung 48: Position der Stellschraube vor dem Fräsvorgang	51
Abbildung 49: Ausgelöste Dehnung als Funktion des Verhältnisses Z/D	54
Abbildung 50: Icon H-Drill	55
Abbildung 51: Auswahl des Einheitensystems	55
Abbildung 52: Angabe von Material- und Geometriedaten (Beispiel Magnesium)	56
Abbildung 53: Eingabe der gemessenen Dehnungen	57
Abbildung 54: berechnete Zahlenwerte	58
Abbildung 55: Dehnungs-Tiefen-Verlauf	58
Abbildung 56: Spannungs-Tiefen-Verlauf in X- und Y-Richtung.....	59
Abbildung 57: Tiefenverlauf max. und min. Hauptspannungen	59
Abbildung 58: Hydrostatisches Glattwalzwerkzeug HGx-9.....	61
Abbildung 59: Hydraulikaggregat HGP6.0	62
Abbildung 60: CAD-Modell Werkzeughalterung	63
Abbildung 61: Prüfkörper	64
Abbildung 62: Nomenklatur der Proben	64
Abbildung 63: Montage der Werkzeughalterung.....	65
Abbildung 64: Montage des Festwalzwerkzeuges und des Hydraulikschlauches.....	65
Abbildung 65: Festwalzvorgang der Probe 01 bei 300bar	68
Abbildung 66: Spannungsverlauf ADI-800-90_1 angeschliffen	71
Abbildung 67: Spannungsverlauf ADI-800-90_2 unbehandelt.....	71
Abbildung 68: Spannungsverlauf ADI-800-23_1	73
Abbildung 69: Spannungsverlauf ADI-800-23_2.....	73
Abbildung 70: Spannungsverlauf ADI-800-27_1	74
Abbildung 71: Spannungsverlauf ADI-800-27_2.....	74
Abbildung 72: Mittelwerte Referenzproben	75
Abbildung 73: Mittlere Spannungsverläufe bei 250 N Festwalzkraft	77
Abbildung 74: Mittlere Spannungsverläufe bei 500 N Festwalzkraft	78
Abbildung 75: Mittlere Spannungsverläufe bei 750 N Festwalzkraft	79
Abbildung 76: Mittlere Spannungsverläufe bei 1000 N Festwalzkraft	80
Abbildung 77: Vergleich Referenzproben mit den Walzkräften in X-Richtung.....	82
Abbildung 78: Vergleich Referenzproben mit den Walzkräften in Y-Richtung.....	83

Abbildung 79: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in X-Richtung	85
Abbildung 80: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in Y-Richtung	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verbrauchsmaterialien zur Probenpräparation	21
Tabelle 2: Oberflächenqualität nach Installationsart	24
Tabelle 3: DMS zur Eigenspannungsmessung	29
Tabelle 4: Steuerung der Achsen.....	66
Tabelle 5: Festwalzkräfte und Druckeinstellungen	67
Tabelle 6: Festwalzprotokoll.....	67
Tabelle 7: Festwalzparameter bei 100 bar.....	76
Tabelle 8: Festwalzparameter bei 200 bar.....	77
Tabelle 9: Festwalzparameter bei 300 bar.....	78
Tabelle 10: Festwalzparameter bei 400 bar.....	80
Tabelle 11: Vergleich der Spannungsmittelwerte	81
Tabelle 12: Festwalzparameter der verschiedenen Spurbreiten	84

Abkürzungsverzeichnis

ADI	Austempered Ductile Iron
CNC	Computerized Numerical Control
DMS	Dehnungsmessstreifen
EKD	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
Fa.	Firma
FEM	Finite Elemente Methode

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	%	Bruchdehnung
B	mm	Breite
D	mm	Rosettenkreisdurchmesser
D_0	mm	Durchmesser Ring-Kern-Bohrung
d	μm	Netzebenenabstand
dL	mm	Längenänderung
dR	Ohm	Widerstandsänderung
H	mm	Höhe
k	1	Proportionalitätsfaktor/K-Faktor
L	mm	Länge
n	1	Anzahl der Netzebenen
R	Ohm	Widerstand
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
R_z	μm	Oberflächenrauigkeit
T	°C	Temperatur
t	s	Zeit
V_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
X	1	Koordinatenrichtung
Y	1	Koordinatenrichtung
Z	mm	Bohrlochtiefe
ε	$\mu\varepsilon$	Dehnung
ν	°	Einstrahl- bzw. Abstrahlwinkel
σ	MPa	Nennspannung
λ	μm	Wellenlänge

1 Einleitung

1.1 Motivation

Aufgrund des immer größer werdenden Kostendruckes in der Entwicklung neuer Produkte und der daraus resultierenden Optimierung von Konstruktionen sowie des Einsatzes von hochwertigen Werkstoffen werden Entwickler dazu gezwungen, die technischen Grenzen von Werkstoffen immer weiter auszureizen. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Werkstoffkennwerte genau zu kennen, um den benötigten Materialeinsatz optimal berechnen zu können. Ebenso muss zur Berechnung der Bauteilsicherheit die Art und Größe der höchstbeanspruchten Stelle bekannt sein. An diesen Stellen ist in der Mehrheit der Fälle davon auszugehen, dass ein mehrachsiger Spannungszustand vorhanden ist. Zur Berechnung wird die maßgebende Beanspruchung des zu erwartenden Versagensfalls in Betracht gezogen und mit Hilfe einer Festigkeitshypothese bestimmt. Diese Werte werden mit dem Kennwert, welcher im Zugversuch im einachsigen Spannungszustand ermittelt worden ist, verglichen [1].

In der Praxis treten, bedingt durch die verschiedenen Fertigungsverfahren, Eigenspannungen gewollt oder ungewollt auf. Besonders bei dynamisch beanspruchten Bauteilen ist es von besonderer Bedeutung, die Eigenspannungen zu kennen, um plötzliches Bauteilversagen wie Sprödbruch zu verhindern oder die Schwingfestigkeit zu erhöhen.

"Dies ist vor allem während der Arbeitsphasen, in denen Struktur, Form und Dimension der Bauteile verändert werden können, um so Materialbruch, Maschinenausfälle oder mechanische Fehlfunktionen zu verhindern, wichtig" [2]. Zugeigenspannungen wirken sich auf die Belastungsfähigkeit des Bauteils negativ aus, was zu einer schnelleren Ausbreitung von Rissen führen kann. Um die Lebensdauer von Bauteilen zu verlängern und die Gefahr eines Defektes zu minimieren, werden besonders kritische Bereiche wie z.B. Kerbradien festgewalzt. Durch das Festwalzen entstehen Bereiche, in denen nun Druckeigenspannungen herrschen und so die Lebensdauer des Bauteils erheblich erhö-

hen. Daher ist es von großer Bedeutung, Eigenspannungen in Qualität und Quantität zu kennen.

1.2 Ziele und Aufgabenstellung

Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist die Durchführung von experimentellen Eigenspannungsmessungen an austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI). Da das Messen von Eigenspannungen bis dato noch nicht an der Hochschule Mittweida zur Anwendung gekommen ist, gilt es, grundlegende Kenntnisse zu erarbeiten. Im ersten Schritt soll eine Methodik zur Präparation der Proben erarbeitet werden. Dazugehörend ist die Auswahl zu treffen, welche Dehnungsmessstreifen (DMS) zu verwenden sind. Ebenfalls gilt es, eine korrekte Auswahl für die verschiedenen Hilfsmittel, welche zum Applizieren der DMS erforderlich sind, zu treffen.

Nachfolgender Aufgabenschwerpunkt ist der Aufbau und die Inbetriebnahme der Eigenspannungsbohrvorrichtung. Weiter soll in diesem Kapitel die Erfassung der Messwerte sowie die dazugehörige Auswertung der Daten, welche mittels der Software "H-Dill" erfolgt, beschrieben werden.

Nachdem eine korrekte Versuchsdurchführung realisierbar ist, sind erste Testmessungen zur Messung der Eigenspannungen an einer Magnesiumprobe vorgenommen worden. Da die Ergebnisse hinsichtlich der Spannungsverläufe über die Tiefe mit den zu erwartenden Werten übereinstimmten, wurde entschlossen, eine erste Messung an dem ADI vorzunehmen.

Anschließend bestand die Aufgabe darin, die ADI-Proben festzuwalzen. Hier wurde auf die vorhandene Technik von ECOROLL zurückgegriffen. Zum anderen war es erforderlich, eine Vorrichtung zur Aufnahme des Festwalzwerkzeuges an eine Fräsmaschine zu entwickeln. Jetzt konnten die ADI-Proben mit unterschiedlichen Festwalzparametern (Walzkraft, Vorschubgeschwindigkeit, Spurbreite) festgewalzt und die Eigenspannungstiefenverläufe ermittelt und ausgewertet werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Definition Eigenspannungen

Als Eigenspannungen werden Spannungen im Inneren eines Werkstückes bezeichnet, ohne dass eine äußere Kraft auf das Werkstück einwirkt [3]. Folglich müssen in Bauteilen sowohl Zug- als auch Druckeigenspannungen vorhanden sein, damit sich das Werkstück im Gleichgewicht befindet [3].

2.2 Entstehung von Eigenspannungen

Während des gesamten Herstellungsprozesses des Werkstückes können Eigenspannungen entstehen. Durch eine ungleichmäßig verteilte bleibende Formänderung, die durch eine Volumenänderung infolge der Abkühlung entsteht, kommt es innerhalb eines Volumenelementes zu Spannungen [4]. So entstehen bei hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten zwischen Randbereich und Kern große Temperaturunterschiede. Da der Randbereich aufgrund der niedrigeren Temperatur zum Schrumpfen neigt, aber durch die höheren Temperaturen im Inneren verhindert wird, kommt es zu Zugeigenspannungen an der Oberfläche (Abbildung 1a, Seite 4). Der Kern kühlt später ab, nun wird die Schrumpfung durch die bereits erstarrte Oberfläche behindert, folglich kommt es zu Druckeigenspannungen an der Oberfläche und zu Zugeigenspannungen im Inneren (Abbildung 1b, Seite 4) [3].

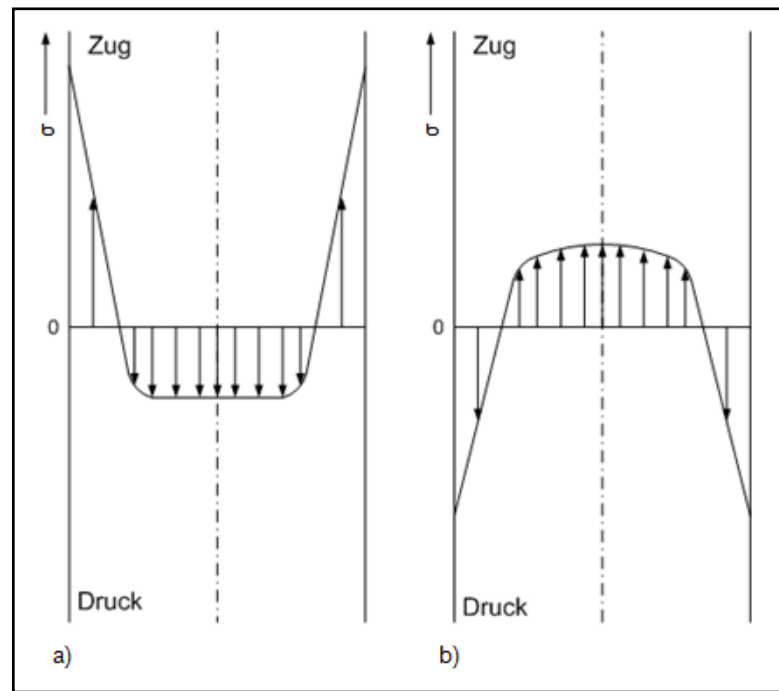


Abbildung 1: Spannungsverteilung infolge schneller Abkühlung

Quelle: [3]

Dieser Zustand der Spannungsverteilung bleibt weitgehend erhalten. Eigenspannungen können ebenfalls durch Wärmedehnungen, chemische Umsetzung, Gefügeumwandlung oder Zustands- und Gestaltänderung entstehen [4]. Besonders bei Herstellungsprozessen wie Gießen, Schmieden, Walzen, Schweißen, Löten, Härten und Vergüten ist die Gefahr der Eigenspannungsentstehung groß. Auch bei mechanischer Bearbeitung der Werkstücke wie Drehen, Fräsen und Schleifen können in oberflächennahen Schichten Eigenspannungen eingebracht werden.

Eigenspannungen entstehen auch durch ungleichmäßige plastische Verformungen. Am Beispiel eines Biegestabes soll dies erläutert werden. In Abbildung 2a (Seite 5) ist der lineare Spannungsverlauf bei elastischer Dehnung gleichmäßig verteilt. Auf der Innenseite der Krümmung sind Druckspannungen und auf der Außenseite Zugspannungen vorhanden. Wird der Stab weiter gebogen, so hängt der Werkstoff nicht mehr von der linearen Gesetzmäßigkeit ab. Der Werkstoff verformt sich plastisch, d.h. im Zugbereich bleibt der Werkstoff gestreckt und im Druckbereich verkürzen sich Bereiche (Abbildung 2b, Seite 5). Nach Wegnahme der Momente können sich nur die elastischen Bereiche zurückverformen.

Im Werkstoff bleiben plastische Bereiche mit Zug- und Druckeigenspannungen enthalten, die eine vollständige Rückverformung verhindern (Abbildung 2c) [3]. Zuletzt soll auch erwähnt werden, dass bei der Montage Eigenspannungen entstehen können [4].

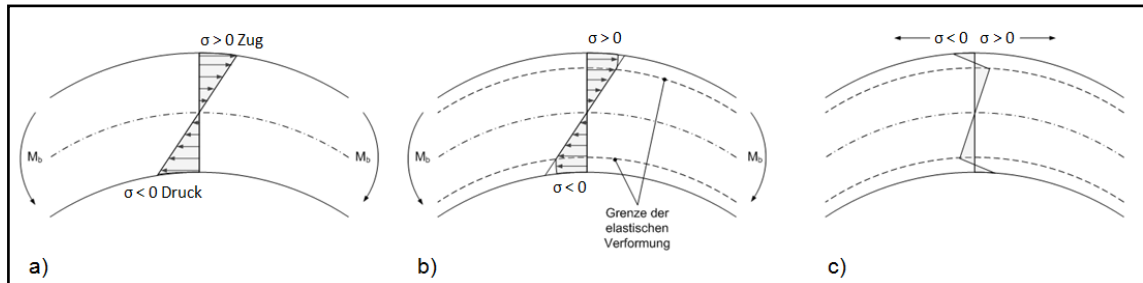


Abbildung 2: Eigenspannung beim Biegen

Quelle: [3]

2.3. Einteilung von Eigenspannungen

Bei der Einteilung von Eigenspannungen wird grundsätzlich nach der Größe der erfassten Werkstoffbereiche und nach den technologischen Herstellungsverfahren unterschieden [6]. Die Einteilung der Eigenspannungen nach Größe der Ausbreitung wird in Makroeigenspannungen und Mikroeigenspannungen unterteilt. Eigenspannungen 1. Art erstrecken sich im Metallgefüge über mehrere Körner und werden als Makroeigenspannungen bezeichnet. Mikroeigenspannungen sind Spannungen 2.- und 3. Art. Die Ausbreitung von Eigenspannungen 2. Art ist auf die Größe eines Korns bzw. Kornbereiche begrenzt. Eigenspannungen 3. Art betreffen Bereiche, die nicht mehr wie einige Atomabstände umfassen [5]. Wenn Makroeigenspannungen vorhanden sind, treten grundsätzlich auch Mikroeigenspannungen auf [3]. In (Abbildung 3, Seite 6) ist die schematische Ansicht der Eigenspannungen 1., 2. und 3. Art dargestellt. In Abhängigkeit von den betroffenen Werkstoffbereichen können die Eigenspannungshöchstwerte 1., 2. und 3. Art sich überlagern. Wie in der Abbildung 3 (Seite 6) zu erkennen ist, können die Maximalwerte 1., 2. und 3. Art im heterogenen Metallgefüge sich um ein Mehrfaches erhöhen als die Maximalwerte der Eigenspannung 1. Art [6].

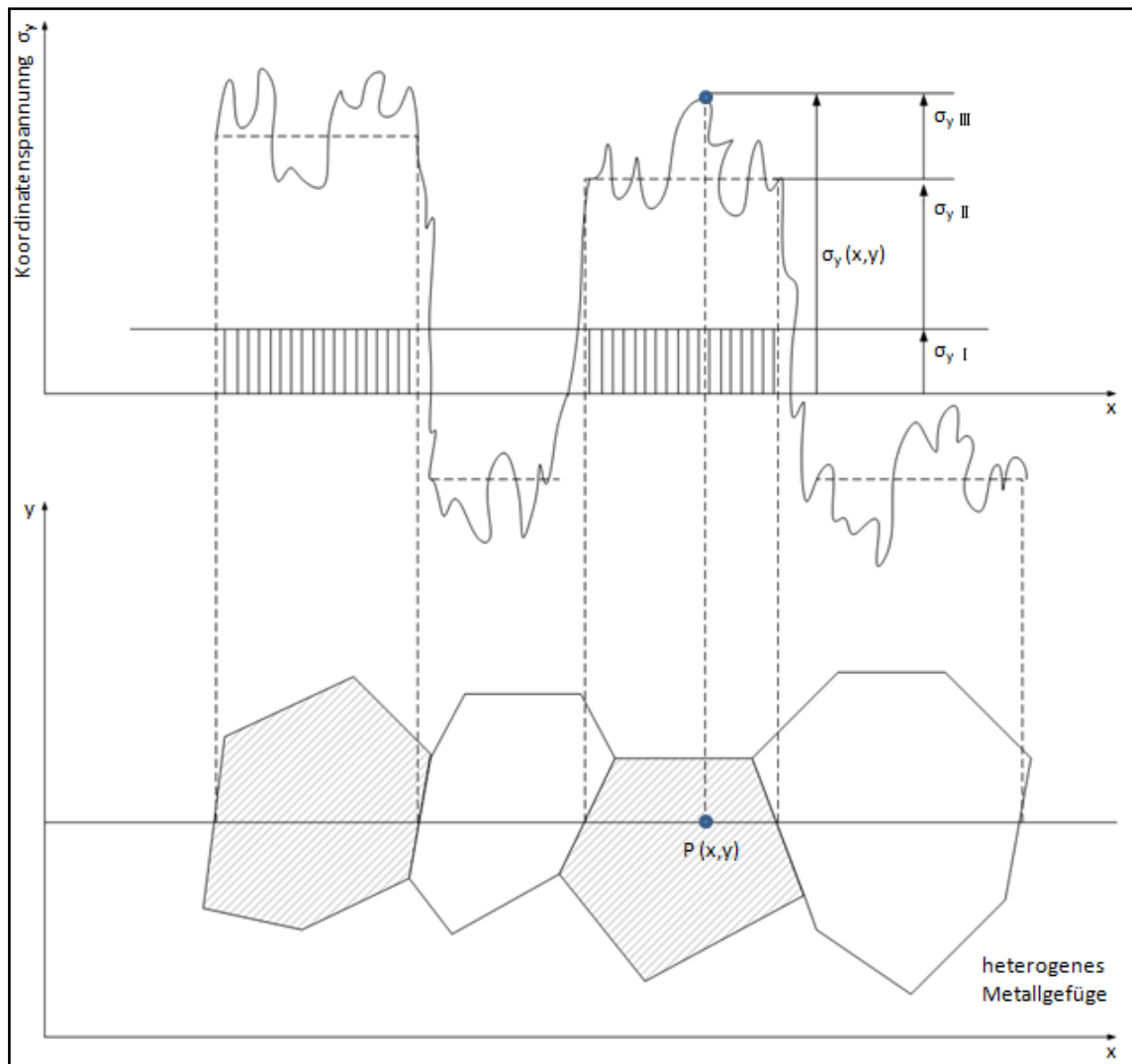


Abbildung 3: Überlagerung der Eigenspannungen

Quelle: [5]

Zur Berechnung von Eigenspannungen soll erwähnt werden, dass nur Eigenspannungen 1. Art in die Berechnung einfließen und mit den verschiedenen Grundlastfällen berechnet werden, da diese nur auf makroskopische Bereiche bezogen werden [5].

Auch können die Eigenspannungen nach den technologischen Herstellungsverfahren eingeteilt werden. Folgende Eigenspannungen kommen am häufigsten in der industriellen Be- und Verarbeitung vor [6]:

- Urformeigenspannungen
- Umformeigenspannungen
- Fügeigenspannungen
- Bearbeitungseigenspannungen

- Wärmebehandlungseigenspannungen
- Beschichtungseigenspannungen

2.4 Abbau von Eigenspannungen

Der Abbau von Eigenspannungen ist durch eine gezielte Wärmebehandlung möglich. So können die Eigenspannungen durch Spannungsarmglühen abgebaut oder vermindert werden. Besonders die Zugeigenspannungen im Randbereich von Werkstücken sollen so vermieden werden [6]. Je größer die Gefahr der Rissbildung ist, desto schneller sollte nach Entstehen der Eigenspannungen spannungsarm gegläut werden [3]. Da mit dieser Wärmebehandlung keine Festigkeitssteigerung erzielt werden soll, muss die Glüh Temperatur unterhalb der Umwandlungstemperatur A_{c1} (Linie PSK, siehe Abbildung 4) im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD) liegen [6]. Die Glüh Temperatur liegt zwischen 550°C bis 650°C.

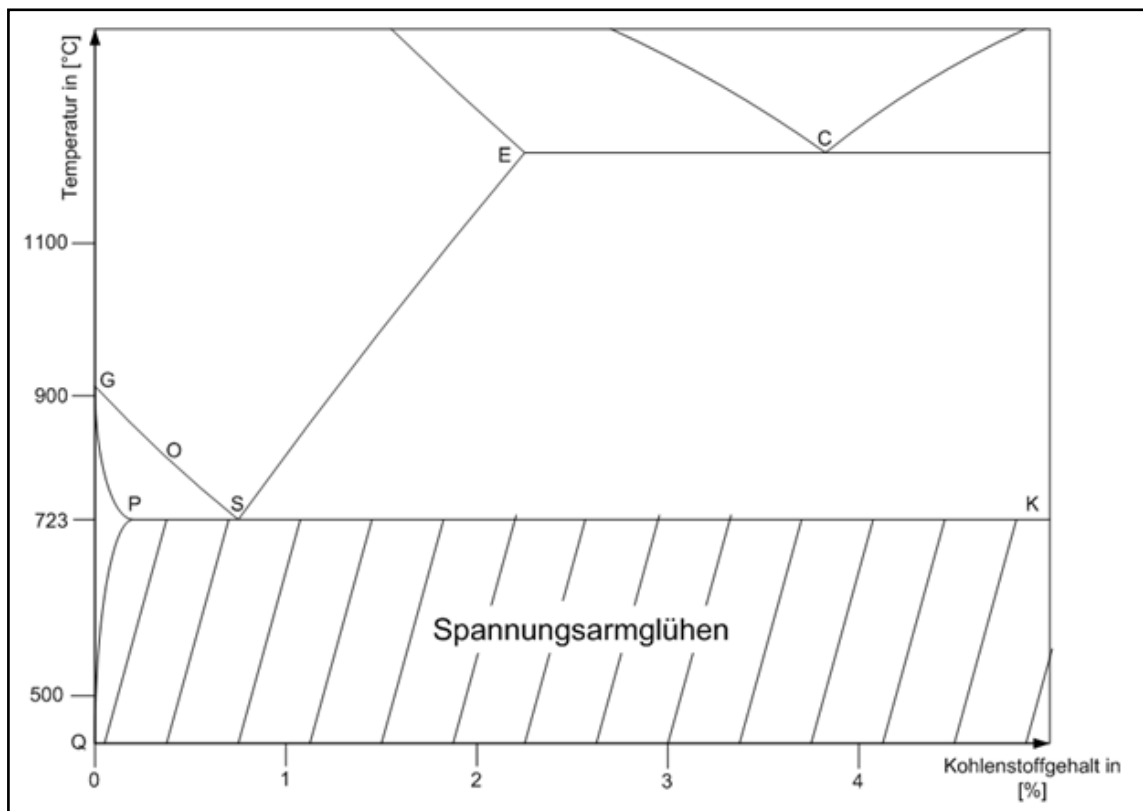


Abbildung 4: Ausschnitt des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms

Quelle: [6]

Durch die erhöhte Wärmezufuhr kommt es zur Abnahme der Streckgrenze. Resultierend daraus können sich Eigenspannungen durch lokale plastische Fließvorgänge verringern. Eine Restspannung bleibt vorhanden, die gleich der Fließgrenze bei der Glühtemperatur ist [7]. Damit die Eigenspannungen abgebaut werden, ist ein Temperatur-Zeit-Verlauf einzuhalten. Dieser besteht aus vier Schritten: (siehe Abbildung 5) [3]

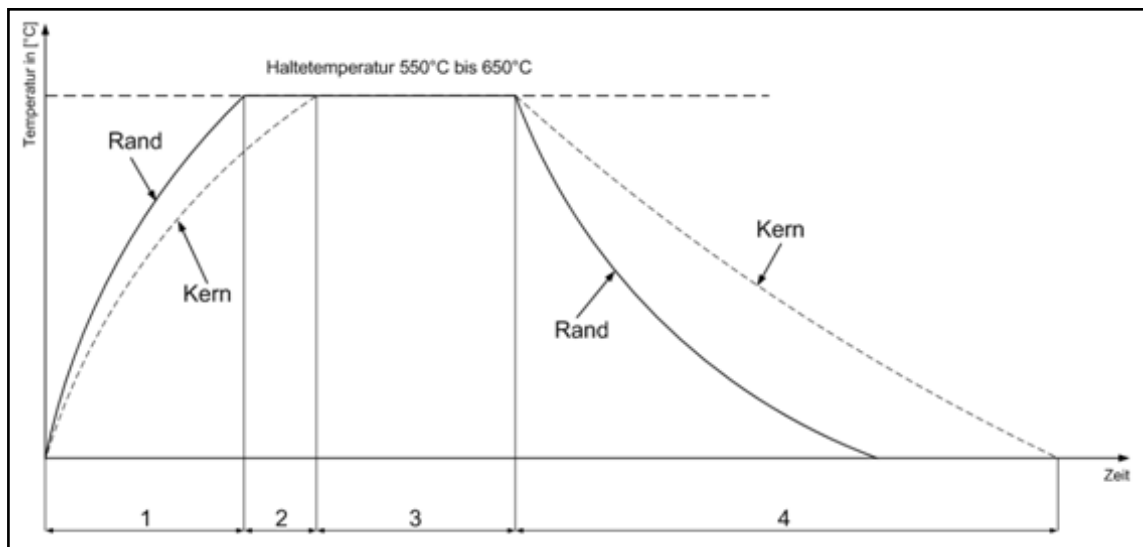


Abbildung 5: Temperatur-Zeit-Verlauf beim Spannungsarmglühen

Quelle: [3]

1. langsames Aufheizen
2. Durchheizen
3. Temperatur ein bis zwei Stunden halten
4. sehr langsames Abkühlen

Die Werkstoffe mit geringer Zähigkeit und die, die zur Rissbildung neigen, sollten im Ofen abgekühlt werden [5]. Durch ungleichmäßige Makrospannungen kann es zum Verzug sowie Abweichungen der Form- und Lagetoleranzen kommen [3].

2.5 Verfahren der Eigenspannungsmessung

Unter diesem Punkt werden die Verfahren der Eigenspannungsmessung beschrieben. Hauptsächlich werden die verschiedenen experimentellen Verfahren näher erläutert. Zur Vollständigkeit soll erwähnt werden, dass Eigenspannungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) ebenfalls berechnet und simuliert werden können, jedoch wird in dieser Arbeit nicht weiter darauf eingegangen.

2.5.1 Experimentelle Eigenspannungsermittlung

Durch mechanisches Bearbeiten von Bauteilen, in welchen Eigenspannungen vorherrschen, werden Materialbereiche mit Eigenspannungen entfernt. Das Bauteil befindet sich in einem Ungleichgewichtszustand und ist bestrebt, diesen auszugleichen. Eine Umlagerung der Eigenspannungen findet im gesamten Bauteil statt und das Resultat sind Dehnungen und Formänderungen. Bei der mechanischen Bearbeitung wie Fräsen oder Schneiden tritt dieser Effekt als Verzug unangenehm in Erscheinung [8]. Die Eigenspannungsmessung basiert auf dieser Grundlage. Wird Material aus einem spannungsbehafteten Bauteil durch Bohren eines Loches mit einem sehr geringen Durchmesser entfernt, werden an dieser Stelle Spannungen freigesetzt. Es kommt zu einer Spannungsrelaxation. Diese Dehnungen können mit DMS gemessen werden. Vergleicht man nun die Daten mit denen vor der mechanischen Bearbeitung, so lassen sich Rückschlüsse auf die freigesetzten Spannungen ziehen. Die Vorteile der mechanischen Eigenspannungsmessung liegen darin, dass diese mit relativ einfachen Mitteln wie DMS zu realisieren sind. Außerdem sind die Eigenspannungen 1. Art über einen gewissen Messbereich gut erfassbar, um diese dann in festigkeitsrelevante Berechnungen mit einfließen zu lassen. Die Methoden der experimentellen Eigenspannungsermittlung lassen sich in drei Gruppen einteilen. Unterschieden wird dabei in zerstörungsfreie, teilzerstörende und zerstörende Verfahren.

2.5.2 Zerstörungsfreie Verfahren

Durch messbare Veränderungen von physikalischen Eigenschaften, hervorgerufen durch Last- oder Eigenspannungen, können Werkstoffe zerstörungsfrei geprüft werden. Da bei den zerstörungsfreien Verfahren keinerlei Schädigungen am Bauteil auftreten, werden diese Verfahren bevorzugt in der Qualitätskontrolle Anwendung finden. Allgemein ist anzumerken, dass mittels der zerstörungsfreien Verfahren der Eigenspannungsmessung nur oberflächennahe Bereiche geprüft werden können. Sind dagegen Aussagen über den Eigenspannungstiefenverlauf nötig, so sind die teilzerstörenden Verfahren besser geeignet. Diese Verfahren sind ausschließlich zur Bestimmung von Eigenspannungen entwickelt worden, dadurch ist eine hohe Prozessgenauigkeit gegeben. In jüngster Zeit findet die zerstörungsfreie Bestimmung von Eigenspannungen aufgrund des weiten Anwendungsspektrums hohes Interesse. Infolgedessen besitzen diese Verfahren noch nicht die nötige Prozessreife.

Eigenspannungen können durch optische Verfahren wie der Speckle-Interferometrie oder dem Raster- und Grauwertkorrelationsverfahren zerstörungsfrei gemessen werden [5]. Auch können direkte Verfahren zur Eigenspannungsmessung wie die Röntgendiffraktometrie eingesetzt werden [10].

Röntgendiffraktometrie

Die röntgenographische Spannungsmessung ist die am häufigsten eingesetzte Methode zur zerstörungsfreien Messung von Eigenspannungen in oberflächennahen Bereichen bis 50 µm Tiefe. Das Prinzip beruht darauf, dass ein Atom, welches mit monochromatischen Röntgenstrahlen beschossen wird, eine Sekundärwelle mit gleicher Wellenlänge, aber geringerer Intensität unter gleichem Winkel zurückwirft [3]. "Sekundärwellen, die von benachbarten Atomen ausgehen, löschen sich durch Interferenzen gegenseitig aus oder verstärken sich, wenn zwischen der Wellenlänge λ , dem Netzebenenabstand d und dem Einstrahl- bzw. Abstrahlwinkel ν die BRAGGsche Reflexionsgleichung

$$2 \cdot d \cdot \sin \nu = n \cdot \lambda \quad (\text{Gl. 2.1})$$

erfüllt ist" (siehe Abbildung 6).

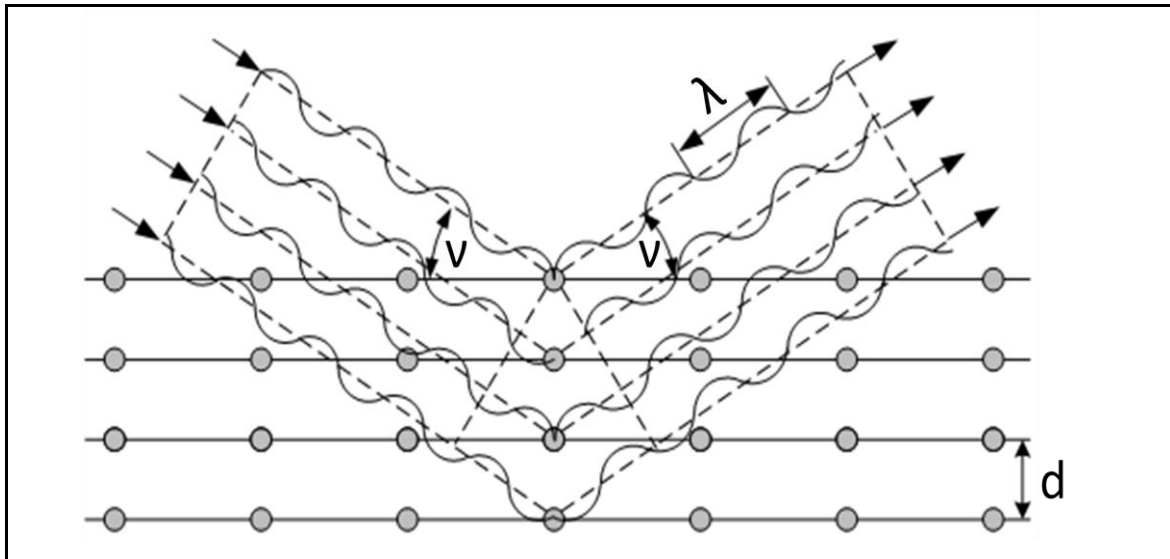


Abbildung 6: BRAGGsche Reflexion

Quelle: [3]

Das *Debye-Scherrer*-Verfahren ist die am häufigsten eingesetzte Methode. Monochromatische Röntgenstrahlen mit einer konstanten Wellenlänge λ bestrahlen eine vielkristalline Probe. Wegen der vielen möglichen Lagen der Netzebenen im Vielkristall, streuen die Reflexe stark. Diese werden, ausgehend von der Probe, kegelförmig auf einem Film abgebildet. Aus der Lage, Schärfe und der Schwärzungsintensität können so Verzerrungen des Gitters durch Eigenspannungen festgestellt werden (siehe Abbildung 7, Seite 12) [3].

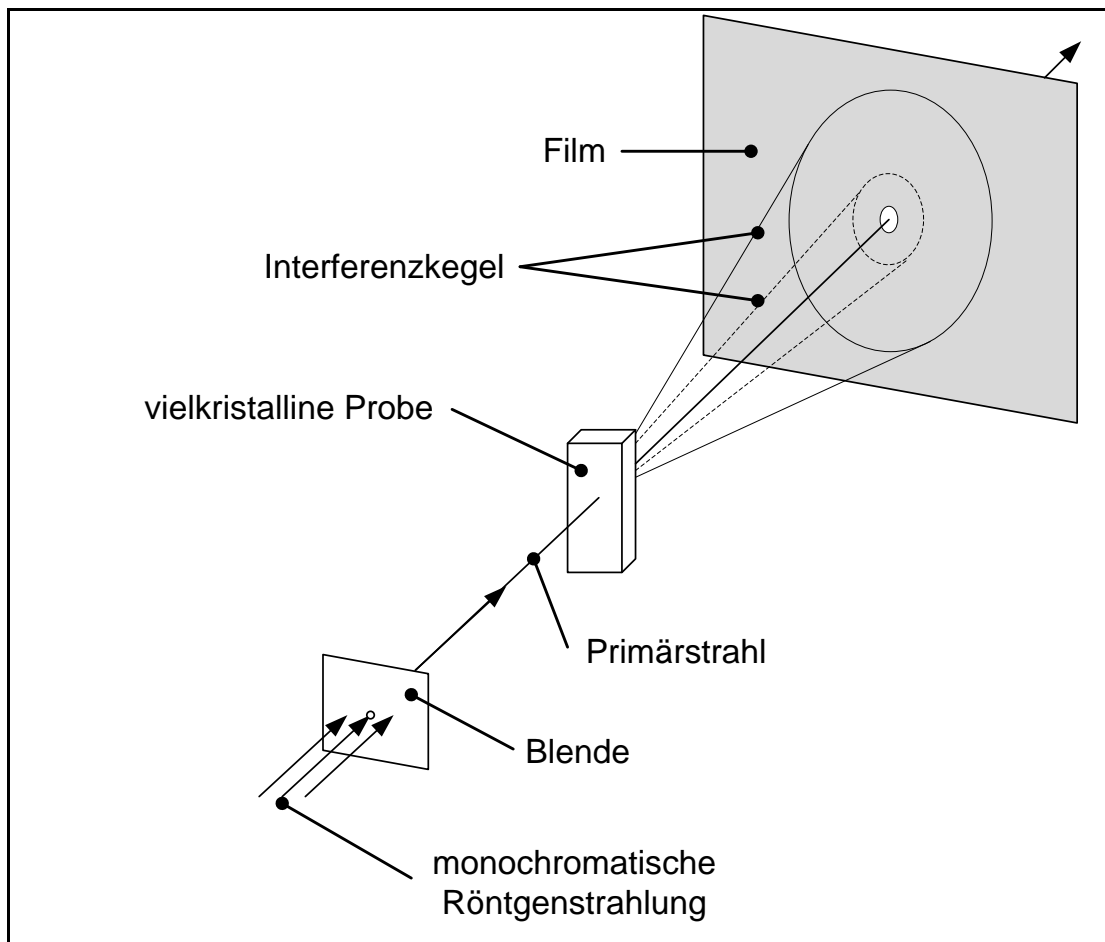


Abbildung 7: Strahlengang beim DEYBE-SCHERRER-Verfahren

Quelle: [3]

Ebenfalls können mit diesem Verfahren Texturen, Kennwerte des Gitters sowie der Aufbau und die Zusammensetzung von Legierungen ermittelt werden [3].

2.5.3 Teilzerstörende Verfahren

Die Einteilung in teilzerstörende Verfahren erfolgt aufgrund der Tatsache, dass das Werkstück zwar lokal beschädigt wird, aber in der Gesamtheit in Form und Größe erhalten bleibt und voll funktionstüchtig ist. Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens sind verschiedene Punkte zu beachten. Die zur Verfügung stehenden Mittel sowie die Messgenauigkeit sollten beachtet werden. Weiterhin ist zu untersuchen, ob die Bauteilgeometrie und die räumlichen Platzverhältnisse gegeben sind [8]. Allgemein gilt: Je höher der experimentelle Messaufwand, desto höher ist die Aussagefähigkeit der Resultate. Zu den teilzerstörenden

Verfahren zählt die Bohrlochmethode, welche im Kapitel drei ausführlich beschrieben wird, da die Erarbeitung einer Prüfmethodik zur Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren ein wesentlicher Bestandteil der Aufgabenstellung dieser Arbeit ist. Nachteilig sind die lokalen Schädigungen, die in das Bauteil eingebracht werden, zu nennen [8].

2.5.3.1 Ring-Kern-Verfahren

Das Ring-Kern-Verfahren ist dem Bohrlochverfahren zur lokalen Eigenspannungsmessung ähnlich. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass nicht im Zentrum der DMS-Rosette ein Loch gebohrt wird, sondern ein Kreisring um eine DMS-Rosette. Diese ist vom Messprinzip (siehe Kapitel 3.2.2) gleich der DMS-Bohrlochrosette, jedoch ist der Aufbau der Messgitter anders (siehe Abbildung 8) [12].

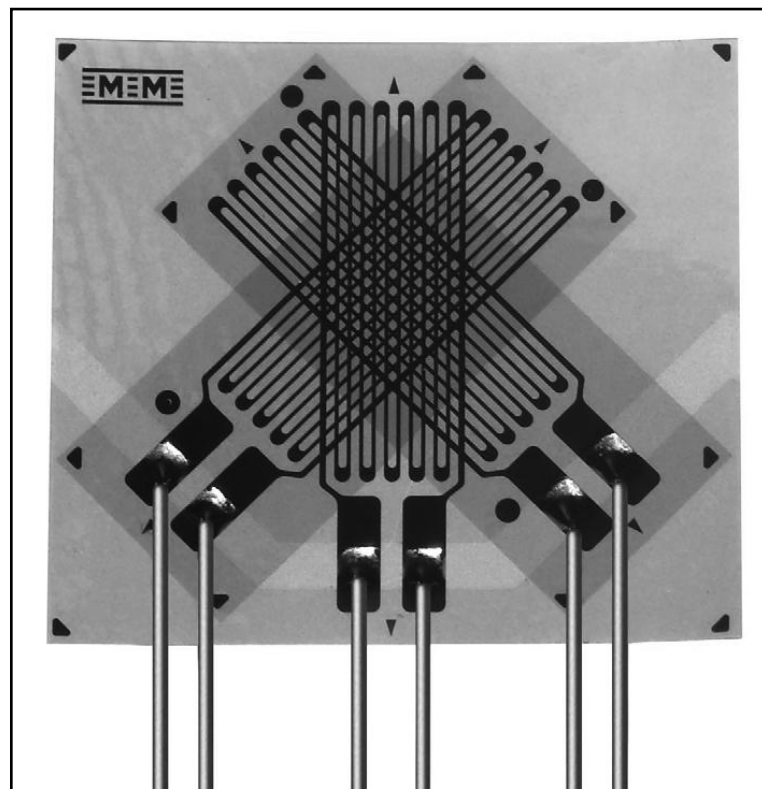


Abbildung 8: DMS für Ring-Kern-Verfahren

Quelle: [12]

Mit dem Ring-Kern-Verfahren ist es möglich, eine vollständige Entspannung des Werkstoffes zu erreichen. Voraussetzung dafür ist, dass die Frästiefe gleich dem Durchmesser D_0 der Kernbohrung ist (siehe Abbildung 9).

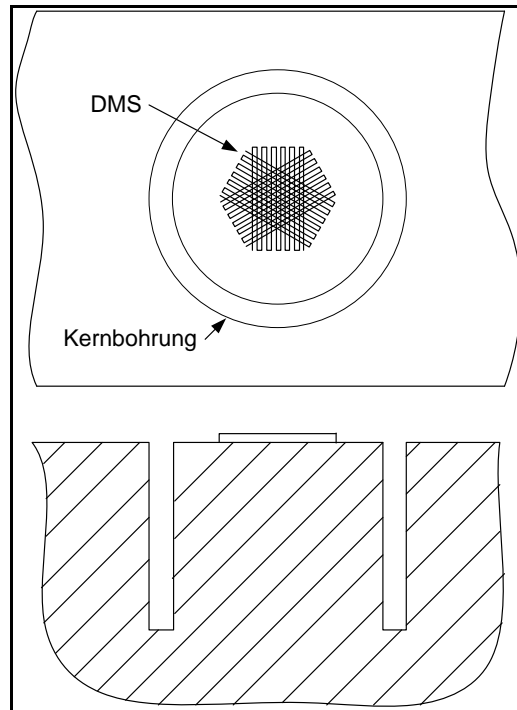


Abbildung 9: Bohr-und Messanordnung beim Ring-Kern-Verfahren

Quelle: [8]

Jedoch ist anzumerken, dass ein Mehraufwand gegenüber dem Bohrlochverfahren notwendig ist. Für dieses Verfahren sind spezielle Werkzeuge notwendig [8].

2.5.3.2 Härte-Verfahren

Nach Definition ist Härte der Widerstand gegen das Eindringen eines anderen, härteren Eindringkörpers. Die Eindringtiefe des Prüfkörpers ist von dem Fließwiderstand des Werkstoffes unter mehrachsiger lokaler Pressung abhängig. Da auch an der Oberfläche Spannungen vorhanden sind, beeinflussen diese die Eindringtiefe des Prüfkörpers. Herrschen Zugeigenspannungen im Bauteil, so ist der Fließwiderstand geringer und der Eindringkörper kann weiter in das Bauteil eindringen. Liegen Druckeigenspannungen vor, so bietet der Werkstoff ei-

nen höheren elastisch-plastischen Widerstand gegen das Eindringen des Prüfkörpers. Das Härte-Verfahren lässt daher nur eine qualitative Aussage über den Eigenspannungszustand zu. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der einfachen Handhabung und der sehr geringen Beschädigung des Prüfkörpers [8].

2.5.4 Zerstörende Verfahren

Bei den zerstörenden Verfahren wird durch eine mechanische Bearbeitung der Werkstoffzusammenhalt zerstört und damit das innere Spannungsgleichgewicht gestört. Sind Eigenspannungen vorhanden, werden diese Formänderungen und Dehnungen hervorrufen. Diese können mit DMS gemessen werden. Die Verfahren der zerstörenden Eigenspannungsmessung haben den Nachteil, dass das Werkstück zum einen zerstört wird und zum anderen nur Mittelwerte erfasst werden können [13]. Zu den zerstörenden Verfahren zählen Biegemethoden, Abtrage- und Ausschneideverfahren sowie Ausbohr- und Abdrehverfahren.

2.5.4.1 Biegemethoden

Biegemethoden kommen immer dann zur Anwendung, wenn die Hauptrichtung des Spannungsfeldes in einer Richtung homogen ist. Dies kommt häufig bei Rohren, Balken und Platten vor. Außerdem muss der Werkstoff infolge der freigesetzten Eigenspannungen eine Biegeverformung ausüben. Die einzubringenden Schnitte in das Prüfstück sind so zu legen, dass eine möglichst große Verformung hervorgerufen wird. Das vereinfacht die Messung und minimiert die Fehler beim Messen. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der relativ einfachen Messung mit mechanischen Messuhren oder Mikrometern. Ebenfalls sind Aussagen von Spannungen über den Querschnitt möglich. Ein größerer theoretischer Aufwand sowie die Kenntnis über den qualitativen Verlauf der Eigenspannungen sind dem Verfahren als Nachteil anzulasten [8].

2.5.4.2 Ausschneiden

Das Prinzip der Eigenspannungsmessung beim Ausschneiden ist, dass an der zu messenden Stelle ein DMS platziert wird und durch Schnitte die Messstelle von dem übrigen Körper getrennt wird. Die so gelösten Eigenspannungen lassen sich als Verformung von den DMS messen und geben Rückschlüsse auf die Spannungen direkt an der Messstelle oder die gemittelten Werte entlang der Schnittfläche. Durch die Verwendung einer DMS-Rosette sind die Spannungen in drei Richtungen zu messen. Dieses Verfahren ist das direkteste und die am vielseitigsten eingesetzte Methode der Eigenspannungsmessung. Dabei ist zu beachten, dass die Genauigkeit der Methode von der Art und Größe der ausgeschnittenen Stücke und der Spannungsgradienten abhängig ist. Einer allgemeinen Anwendbarkeit und wenig theoretischer Vorarbeiten steht ein großer Mess- und Bearbeitungsaufwand gegenüber. Da Biegeeffekte die Resultate stark beeinflussen, ist das Verfahren nur bei ebenen Spannungszuständen mit hinreichender Genauigkeit anzuwenden [8].

2.5.4.3 Ausbohr- und Abdrehverfahren

Das Ausbohr- und Abdrehverfahren ist für Bauteile wie Rohre, Ringe und zylindrische Stäbe mit rotationssymmetrischem Eigenspannungsverlauf geeignet. Es kann auf zwei verschiedene Arten gemessen werden. Beim Ausbohrverfahren werden die DMS auf der Mantelfläche platziert. Durch eine stufenweise Aufbohrung mit immer größer werdendem Durchmesser wird die Wandstärke mehr und mehr geschwächt. "Aus den gemessenen Dehnungsänderungen lassen sich mit Hilfe der allgemeinen Gleichgewichtsbedingungen einer Zylinderschale und unter Annahme eines rotationssymmetrischen Spannungszustands alle vier Spannungskomponenten als Funktion des Radius berechnen". Beim Abdrehverfahren hingegen wird der DMS an der Mantelfläche der Bohrung platziert und es erfolgt ein schichtweises Abdrehen von außen. Nachteilig wirkt sich der hohe Bearbeitungsaufwand durch das Bohren oder Abdrehen dieses Verfahrens auf die Bearbeitungszeit aus, jedoch lässt sich der Spannungszustand vollständig bestimmen [8].

3 Die Bohrlochmethode

3.1 Allgemeines

Im Jahr 1934 wurde von Mathar das Bohrlochverfahren als verhältnismäßig schonende Methode zur Bestimmung von Eigenspannungen in technischen Bauteilen vorgestellt. Anfangs war es jedoch nur möglich, Spannungsmittelwerte über die Bauteildicke zu bestimmen. In den ersten Versuchen wurden die Bauteile mit einer Durchgangsbohrung versehen. Die Grundlagen stellte Kirsch 1898 für den einachsigen Spannungszustand auf. Mathar gelang es, die Dehnungen mit mechanischen Extensometern zu messen und die Spannungen mit den von Kirsch aufgestellten Gleichungen zu berechnen. Eine entscheidende Verbesserung erfuhr das Verfahren im Jahr 1950 durch den erstmaligen Einsatz von DMS-Rosetten. Jetzt konnten die Richtungen der Hauptspannungen ermittelt werden. Ein Jahr später wurde das Ring-Kern-Verfahren (siehe Kapitel 2.5.3.1) entwickelt, konnte sich aber bis heute aufgrund des Mehraufwandes im Vergleich zur Bohrlochmethode nicht durchsetzen [13].

Um jedoch genauere Informationen über den oberflächennahen Tiefenverlauf der Eigenspannungen zu gewinnen, erwies es sich als unpraktisch, nur Spannungsmittelwerte zur Bestimmung des Eigenspannungszustandes zur Verfügung zu haben. Stattdessen ist es praktischer, ein Sackloch zu bohren. Der Nachteil des Sackloches ist jedoch, dass der Spannungs- bzw. Dehnungszustand an der Oberfläche nicht mehr analytisch berechnet werden kann. Der Grund dafür ist, dass sich ein dreiaxsiges Spannungsfeld aufbaut, das von mehreren Faktoren abhängig ist. Nun war es möglich, grobe Aussagen zum Spannungsfeld zu treffen, da die von Kirsch aufgestellten Grundlagen durch geometrieabhängige Koeffizienten, welche durch empirische Versuche ermittelt worden sind, ergänzt wurden. Mit deren Hilfe konnte man Aussagen zum Spannungsfeld um ein gebohrtes Loch in Abhängigkeit der Bohrtiefe treffen. Eine wesentliche Verbesserung des Verfahrens führte Kelsey 1956 ein. Ihm gelang es, die für jede Bohrtiefe gemessenen Dehnungsänderungen zu messen.

Nun war man erstmals in der Lage, Eigenspannungstiefenverläufe mit den Hauptrichtungen der Spannungen bestimmen zu können [13].

Ein großer Nachteil zur damaligen Zeit war die Fehleranfälligkeit der experimentellen Messung sowie die noch nicht einheitliche Anordnung der Messgitter um das Bohrloch. Somit war ein direkter Vergleich unmöglich. 1966 entwickelten Rendler und Vigness eine Geometrie für DMS-Bohrlochrosetten, welche später genormt wurde [13].

Durch die ständige Weiterentwicklung bis zur heutigen Zeit gilt dieses Verfahren als die am weitesten verbreitete moderne Methode der Eigenspannungsmessung. Die Bohrlochmethode ist das einzige Verfahren, welches in der international anerkannten Norm ASTM E 837-99 standardisiert worden ist. Aufgrund der geringen lokalen Schädigung durch das Einbringen des Bohrloches wird diese Methode zu den teilzerstörenden Verfahren der Eigenspannungsmessung zugeordnet. Durch das Einbringen eines Sackloches werden die Eigenspannungen lokal entspannt. Die Messgitter einer DMS-Rosette sind radial um das Bohrloch angeordnet und dienen der Erfassung der Dehnungsänderung während des Bohrvorganges. Durch sukzessives Zustellen der Bohrtiefe erhält man Informationen über den Eigenspannungsverlauf. Der Ablauf der Eigenspannungsmessung erfolgt dabei in sechs aufeinander abfolgenden Punkten [9]:

1. an der zu bestimmenden Stelle auf dem Bauteil, an dem die Eigenspannungen ermittelt werden sollen, ist eine DMS-Rosette zu installieren
2. Verbindung des DMS mit einem Messverstärker zur Aufnahme der Dehnungen
3. Platzierung der Bohrvorrichtung auf dem Bauteil unter Beachtung der korrekten Ausrichtung zentral mittig über dem DMS
4. nach Nullabgleich des DMS wird stufenweise das Bohrloch in das Bauteil eingebracht
5. die ausgelösten Dehnungen werden vom DMS gemessen und im Messverstärker abgespeichert
6. die Messdaten werden in die Software H-Drill importiert und darauf werden die Hauptspannungen und ihre Winkelorientierung berechnet

3.2 Versuchsdurchführung DMS-Applikation

Ein wesentlicher Schwerpunkt in dieser Arbeit bestand darin, eine Systematik zur Eigenspannungsmessung zu entwickeln. Unter den nachfolgenden Punkten soll ausführlich das Verfahren der Bohrlochmethode, die vorbereitenden Arbeiten, die benötigten Hilfsmittel und die detaillierte Arbeitsreihenfolge zur korrekten Eigenspannungsmessung dargestellt werden. Weiterhin bestand die Aufgabe, sich in die Software H-Drill einzuarbeiten, um korrekte Ergebnisse zu erzielen und diese auswerten zu können.

3.2.1 Versuchsvorbereitung

Für eine korrekte Durchführung der Bohrlochmethode gilt es im Vorfeld, sich über die zu verwendenden Materialien und Werkzeuge ausführlich zu informieren, da bei experimentellen Methoden kleine Ungenauigkeiten in der Durchführung mitunter großen Einfluss auf das Ergebnis zur Folge haben kann. Bei der Bohrlochmethode hängt dies von folgenden technischen Faktoren ab [9]:

- der Auswahl der DMS sowie der korrekten Installation
- der Positionierung des Fingerfräasers im Zentrum der DMS-Bohrlochrosette
- der richtigen Einstellung der Parameter am Messverstärker
- dem Verständnis für die mechanischen Eigenschaften des Probenwerkstoffes und ein Feingefühl bei dem Fräsvorgang

Vorbereitung der Oberfläche zur DMS-Applikation

Dank moderner Werkstoffe lassen sich auf nahezu allen festen Werkstoffen DMS applizieren. Voraussetzung ist jedoch, dass die Stelle, an der der DMS platziert werden soll, in richtiger Weise vorbehandelt werden muss. Die Fa. Vishay Micro Measurements entwickelt und produziert DMS und die dazugehörigen Applikationsmittel. Werden die Anweisungen von Vishay Micro Measurements, sowohl die Klebe- als auch die DMS-Handhabung, präzise und

mit höchster Sorgfalt ausgeführt, lassen sich dauerhaft stabile Klebeverbindungen herstellen. Dies ist besonders wichtig, da bei der Messung kleinste Änderungen der Dehnungen aufgenommen werden. Ist der DMS nicht korrekt geklebt, so entstehen an diesem Punkt in der Versuchsdurchführung erhebliche Fehler. Daher ist besonders hervorzuheben, dass, wenn auch augenscheinlich, eine saubere Oberfläche vorhanden ist, diese als kontaminiert anzusehen ist. Daher sollte die Reinigung der Probe direkt vor der Installation des DMS vorgenommen werden. Ebenso müssen die einzelnen Chemikalien, die zur DMS-Klebung benötigt werden, sowie der DMS selbst, chemisch sauber sein, um die gewünschte Qualität der Klebeverbindung zu erhalten [14].

Für den Werkstoff EN-GJS-800-8, der für die Versuche (siehe Kapitel 4 und 5) zur Anwendung kommt, gelten die nachfolgend genannten fünf Arbeitsschritte der Oberflächenvorbereitung [14]:

Schritt 1: Entfetten mit Lösungsmitteln

Schritt 2: Aufrauen/Schmirgeln

Schritt 3: Markieren des DMS-Installationsplatzes

Schritt 4: Konditionierung der Installationsfläche

Schritt 5: Neutralisierung der Installationsfläche

Das Ziel der fünf Arbeitsschritte ist es, eine chemisch saubere Oberfläche mit der gewünschten Oberflächenrauigkeit, den Linien zur DMS-Platzierung sowie einem pH-Wert von 7 herzustellen [14]. Um eine Rekontamination zu verhindern, sollten bei allen fünf Schritten folgende Punkte vermieden werden.

- Oberfläche mit den Fingern berühren
- der mehrmalige Gebrauch von GAZE-Tupfern oder anderen Reinigungsmitteln und ein Hin- und Herwischen dieser
- Verschmutzung des gesäuberten Bereiches durch Hereinziehen aus dem ungesäuberten Bereich
- das Eintrocknen der Reinigungsreagenzien auf der Oberfläche
- Wartezeiten zwischen Säuberung und DMS-Installation von mehr als einigen Minuten

Bevor mit der Probenpräparation begonnen werden kann, ist die Vollständigkeit aller Utensilien zu überprüfen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die benötigten Verbrauchsmaterialien. Diese sind von der Fa. Vishay Micro Measurements bezogen worden.

Tabelle 1: Verbrauchsmaterialien zur Probenpräparation

GAZE-Tupfer
Wattestäbchen
GC-6 Isopropyl-Alkohol
M-Prep Neutralizer 5A
M-Prep Conditioner A
SCP-2 Silizium-Schmirgelpapier 320-er Körnung
Dehnungsmessstreifen CEA-06-062UL-120
PCT-2M Klebeband
M-Bond 200 Katalysator
M-Bond 200 Kleber
PVC-Flachbandkabel 330-DFV
Lötzinnspule 361A-20R
Flussmittel M-Flux AR-2
M-Line Rosin Solvent

Schritt1: Entfetten mit Lösungsmitteln

Der erste Schritt der Oberflächenvorbereitung ist immer das Entfetten der Oberfläche und dient dem Zweck, Öle, Fette, organische Verunreinigungen und chemische Rückstände zu entfernen [14]. Weiterhin soll eine Einarbeitung der Verunreinigung in den Werkstoff durch den nachfolgenden Schritt des Aufrauens/Schmirgelns unterbunden werden. Zur Anwendung bei den Versuchen (Kapitel 4 und 5) kam das Lösungsmittel GC-6 Isopropyl-Alkohol, wie in (Abbildung 10, Seite 22) zu sehen ist.



Abbildung 10: Probenreinigung mit GC-6 Isopropyl-Alkohol

Vorzugsweise ist bei kleineren Proben die gesamte Probe zu reinigen. Ist das nicht möglich, z.B. bei großen Bauteilen, so ist ein Abstand von 100 mm bis 150 mm zum DMS einzuhalten. Damit wird eine Neuverschmutzung durch die nachfolgenden Schritte verhindert. Anschließend ist die Glasplatte mit M-Prep Neutralizer 5A und GAZE-Tupfer zu reinigen (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Reinigung der Glasplatte mit M-Prep Neutralizer 5A und GAZE-Tupfer

Schritt 2: Aufrauen/Schmirlgeln

Der Zweck des Aufrauens bzw. Abschmirlgelns der Oberfläche dient der Entfernung einer Oxid- oder galvanischen Schicht, der Beseitigung loser Teile und Farbe. Durch das Schmirlgeln soll eine bestimmte Oberflächentextur hergestellt werden, die eine sichere DMS-Klebeverbindung garantiert. Handelt es sich um besonders raue oder schuppige Oberflächen, so ist ein maschinelles Schleifen unumgänglich. Die Bearbeitung der Oberfläche mit Maschinen ist besonders vorsichtig vorzunehmen, um die Gefahr einer erneuten Spannungsinduzierung zu vermeiden [14].

Das Oberflächenfinish wird schlussendlich durch Nassschmirlgeln mit SCP-2 Silizium-Schmirlgelpapier 320-er Körnung und M-Prep Conditioner A (siehe Abbildung 12) erzeugt. Da M-Prep Conditioner A eine schwache Säurelösung ist, sollte vorher die Verträglichkeit mit dem Probenmaterial getestet werden. Anschließend sind die Schleifreste mit GAZE-Tupfern in eine Richtung abzuwischen.

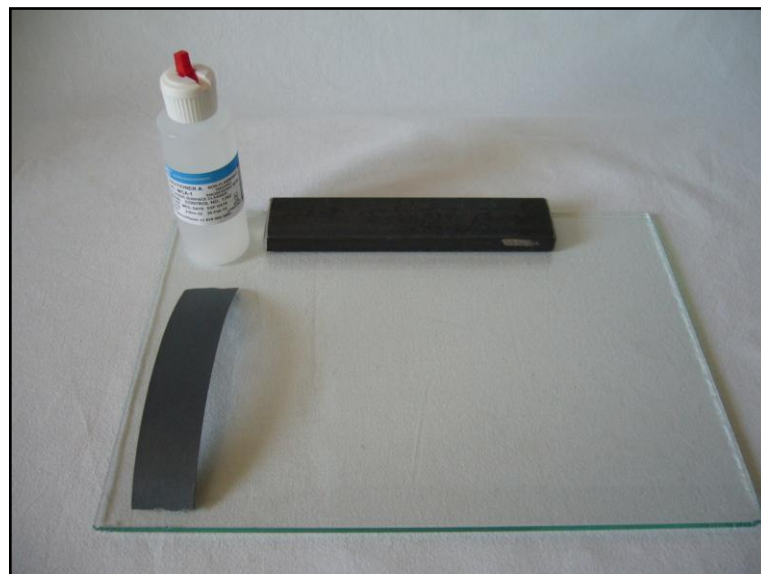


Abbildung 12: M-Prep Conditioner A und SCP-2 Silizium-Schmirlgelpapier 320-er Körnung

Zuletzt hängt das optimale Oberflächenfinish von dem Anwendungszweck der DMS-Installation ab. Während für die normale Spannungsanalyse eine Oberflächenrauigkeit von $R_z = 2,5 \mu\text{m}$ vollkommen ausreichend ist, sind z.B. für den Messwertaufnehmerbau Oberflächenrauigkeiten von $R_z = 0,5 \mu\text{m}$ bis $1,5 \mu\text{m}$

erforderlich. Damit soll ein Kriechen der Klebeschichten minimiert werden [14]. Anders ist dies bei hohen Dehnungen. Hier ist es von Vorteil, eine größere Oberflächenrauigkeit für ein besseres Haftvermögen herzustellen. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zu den erforderlichen Rauigkeiten in Abhängigkeit der Installationsart. Im Kapitel 5 soll eine Vergleichsmessung zwischen einer unbehandelten und einer angeschliffenen Probe Auskunft darüber geben, ob dies eine messbare Veränderung des Eigenspannungszustandes zur Folge hat.

Tabelle 2: Oberflächenqualität nach Installationsart

Installationsart	Oberflächenfinish
	Effektivwert (RMS) in μm
Allgemeine Spannungsanalyse	1,5 - 3,5
Hochdehnung	> 6,5
Messwertaufnehmerbau	0,5 - 1,5
Bei Benutzung von Keramikzement-Kleber	> 6,5

Quelle: [14]

Schritt 3: Markieren des DMS-Installationsplatzes

Der DMS-Installationsplatz wird durch das Anzeichnen eines Linienkreuzes auf der Probenoberfläche markiert. Die beiden Linien kreuzen sich orthogonal im Zentrum der DMS-Rosette (siehe Abbildung 13). Beim Klebevorgang des DMS sind die Markierungslinien mit den Orientierungsmarken, welche sich auf dem DMS befinden, deckungsgleich anzuordnen. Die beiden Linien geben die Hauptrichtungen X und Y vor, da diese mit den Messgittern eins und drei parallel verlaufen (siehe Abbildung 13, Seite 25) [12].

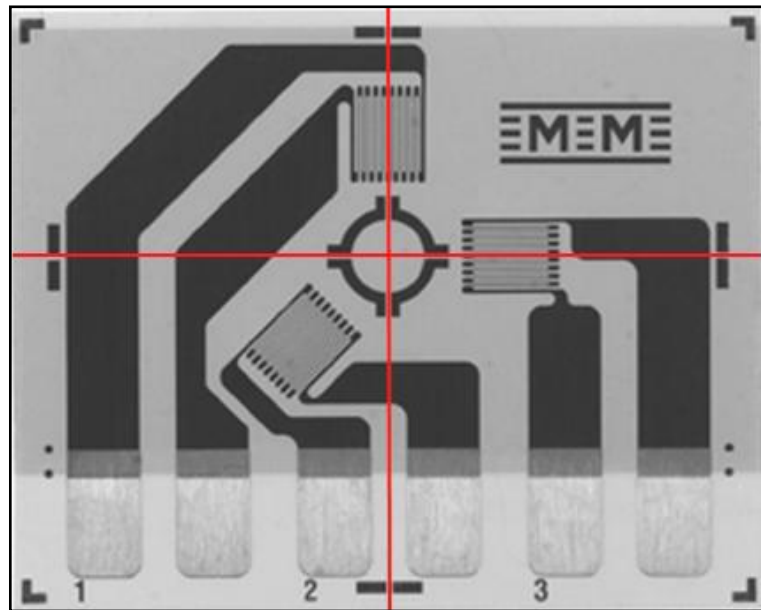


Abbildung 13: Markierungslinien mit DMS

Quelle: [12]

Die Markierungslinien sollten möglichst oberflächenschonend hergestellt werden. Oft reicht es schon aus, unter leichtem Druck eine optische Linie zu erzeugen, so dass nur ein Polier- oder Glättungseffekt an der Oberfläche entsteht [14]. Dazu eignet sich entweder ein Bleistift des Härtegrades 4H oder eine leere Kugelschreibermine. Auf jeden Fall muss eine Schädigung in Form einer Anrisslinie z.B. mit einer Reißnadel vermieden werden, da dies eine Änderung der Spannungskonzentration zur Folge haben kann [14].

Schritt 4: Konditionierung der Installationsfläche

Durch das Anzeichnen der Markierungslinien wurde die Oberfläche verschmutzt. Zum Reinigen der Oberfläche wird wiederholt M-Pep Contitioner A auf die Probe aufgetragen und mit einem Wattestäbchen die Installationsfläche abgerieben (siehe Abbildung 14, Seite 26), solange bis sich das Wattestäbchen nicht mehr verfärbt. Anschließend ist die Oberfläche unter festem Druck mit einem GAZE-Tupfer in eine Richtung abzuwischen. Es ist zu beachten, dass der GAZE-Tupfer im gesäuberten Bereich angesetzt wird, um eine Neuverschmutzung zu verhindern. Anschließend ist der Vorgang in die andere Richtung durchzuführen [14].



Abbildung 14: Reinigung der Überreste der Markierungslinien

Schritt 5: Neutralisierung der Installationsfläche

Der letzte Schritt der Probenvorbereitung ist die Neutralisation der Oberfläche. Der Grund hierfür ist eine Einstellung der Oberfläche auf einen pH-Wert von 7,0 bis 7,5. Dies erzielt in Kombination mit dem Kleber M-Bond 200 und den DMS von Vishay Micro Measurements beste Ergebnisse hinsichtlich der Klebeverbindung. Das Neutralisieren erfolgt mit M-Prep Neutralizer 5A durch großzügiges Aufbringen auf der zuvor mit M-Pep Contitioner A behandelten Oberfläche [14]. Mit dem Wattestäbchen ist der M-Prep Neutralizer 5A zu verteilen und anschließend mit einem GAZE-Tupfer die Rückstände des M-Prep Neutralizer 5A zu beseitigen. **Achtung:** Die GAZE-Tupfer sind in eine Richtung abziehen, um eine Neuverschmutzung zu verhindern. Bei der Neutralisation wird in gleicher Weise vorgegangen wie bei der Trocknung der Oberfläche bei der Konditionierung. Wurden alle Schritte sorgfältig ausgeführt, ist eine sichere Klebeverbindung gewährleistet.

3.2.2 Dehnungsmessstreifen

In diesem Punkt soll ein kurzer Einblick in die Grundlagen der Spannungs- und Dehnungsmessung mittels DMS gegeben werden. Weiterhin vermittelt dieser Punkt einen Überblick über die zu beachtenden Kriterien bei der Auswahl eines geeigneten DMS und die Anforderungen, welche an ihn bestehen. Ebenfalls wird in diesem Punkt die korrekte Vorgehensweise zur DMS-Applikation detailliert beschrieben.

Grundlagen der Spannungs- und Dehnungsmessung mittels DMS

Das Verfahren zur Messung von Dehnungen und der daraus ermittelten Spannungen mittels DMS beruht auf der Änderung des Ohmschen-Widerstandes infolge der elastischen Verformung metallischer Drähte. Die Änderung des Widerstandes der DMS wird in geeignete elektrische Signale umgewandelt und in einem Messverstärker angezeigt. Zwischen relativer Widerstandsänderung und relativer Längenänderung lässt sich folgender Zusammenhang angeben [17]:

$$\frac{dR}{R} = k * \frac{dL}{L} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Hierbei ist k ein Proportionalitätsfaktor. Die auf den Widerstand R des verformten Drahtes bezogene Widerstandsänderung dR ist in erster Näherung der auf die Ausgangslänge L bezogenen Längenänderung dL proportional. Für kleine Dehnungen ε entsteht zwischen relativer Widerstandsänderung und Dehnung der lineare Zusammenhang [17]:

$$\frac{dR}{R} = k * \varepsilon \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Auswahl des Dehnungsmessstreifens

Die Auswahl der richtigen DMS richtet sich vordergründig nach der durchzuführenden Messaufgabe. Sind an die späteren Einsatzbedingungen Anforderungen wie die dauerhafte Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit gestellt, so kann die richtige Auswahl des DMS entscheidend sein. Weiterhin wird die Auswahl des richtigen DMS zum einen durch die vorliegenden Umgebungs- und Anwendungsbedingungen und zum anderen durch die Einschränkungen, die sich bei der Installation und Wartung ergeben, beeinflusst. Generell muss bei der DMS-Anwendung mit Kompromissen gerechnet werden. Zusammengefasst ergeben sich folgende Auswahlkriterien [15]:

- Messgenauigkeit
- Stabilität
- Temperatur
- Dehnungsbereich
- Versuchsdauer
- Installationsschwierigkeiten
- Umgebungsbedingungen

Im allgemeinen wird der Messdraht bei DMS zur Spannungsanalyse mäanderförmig, flächenhaft oder als Flachspule ausgebildet. In Abbildung 15 sind die drei Hauptkomponenten eines DMS dargestellt.

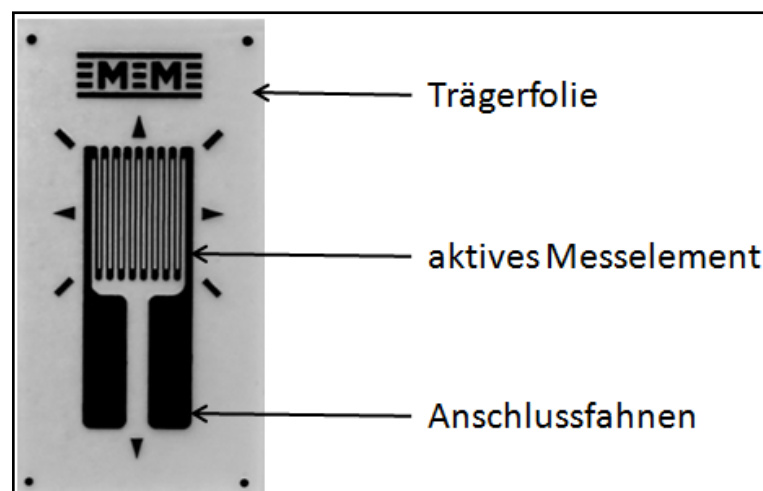


Abbildung 15: Hauptbestandteile eines DMS zur Spannungsanalyse

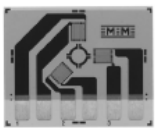
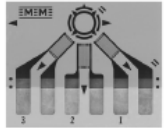
Quelle: [12]

Das Trägermaterial eines konventionellen Folien-DMS besteht aus fotochemisch herausgeätzten Gittern auf einer Trägerfolie aus Kunststoffmaterial [15]. Der Träger hat mehrere Funktionen zu erfüllen:

- Erleichterung in der Handhabung bei der DMS-Installation
- Zurverfügungstellung der Klebefläche zwischen DMS und Bauteil
- stellt Isolationsschicht zwischen Gitter und Bauteil her
- Die zwei kupferplattierten Anschlussfahnen ermöglichen die Verdrahtung mit dem Messverstärker.

Für die Aufgabe, die Eigenspannungen zu messen, ist es nicht empfehlenswert, einzelne DMS wie in Abbildung 15 um das Bohrloch herum zu platzieren, da eine korrekte Ausrichtung zum Bohrloch und zu den anderen zwei DMS nicht einfach ist. Kleinste Abweichungen in der Platzierung haben große Fehler in der Auswertung zur Folge [9]. Vielmehr ist es sinnvoll, auf die DMS-Rosetten, die speziell zur Eigenspannungsanalyse entwickelt worden sind, zurückzugreifen. Zwei Rosettentypen, die besonders gut geeignet sind, stehen zur Auswahl. In Tabelle 3 sind die Modelle CEA-XX-062UL-120 und CEA-XX-062UM-120 abgebildet. Da beide Modelle die gleichen Voraussetzungen erfüllten, wurde entschieden, aufgrund der geringeren Kosten das Modell CEA-XX-062UL-120 einzusetzen.

Tabelle 3: DMS zur Eigenspannungsmessung

CEA-XX-062UL-120		$120 \pm 0.4\%$	0.062	0.202	0.06	0.08	0.50	0.62
			1.57	5.13	1.5	2.0	12.7	15.7
			Voll gekapselte Gitter mit grossen, kupferplattierten Anschlussfahnen. Gleiche Gitteranordnung wie 062RE.					
CEA-XX-062UM-120		$120 \pm 0.4\%$	0.062	0.202	0.06	0.08	0.38	0.48
			1.57	5.13	1.5	2.0	9.6	12.2
			Voll gekapselte Rosette, grosse, kupferplattierte Anschlussfahnen. Abstand der Trimm-Kreislinie zum Bohrlochzentrum 1.73 mm. Mögliche Einschränkungen bei den Datenberechnungsgleichungen.					

Quelle: [12]

Dehnungsmesstreifen applizieren

Ein erneutes Reinigen der Glasplatte (siehe Abbildung 11, Seite 22) ist notwendig. Mit einer Pinzette ist der DMS aus dem Umschlag zu nehmen und mit der Klebefläche auf die Glasplatte zu legen. Ein ca. 150 mm Stück des PCT-2M Klebebandes ist über den DMS zu kleben und vorsichtig von der Glasplatte unter flachem Winkel von ca. 45° abzuziehen (siehe Abbildung 16). Bei der Positionierung ist auf zentrale Ausrichtung zu achten, das heißt, dass der DMS parallel und mittig auf dem PCT-2M Klebeband fixiert werden muss [18].

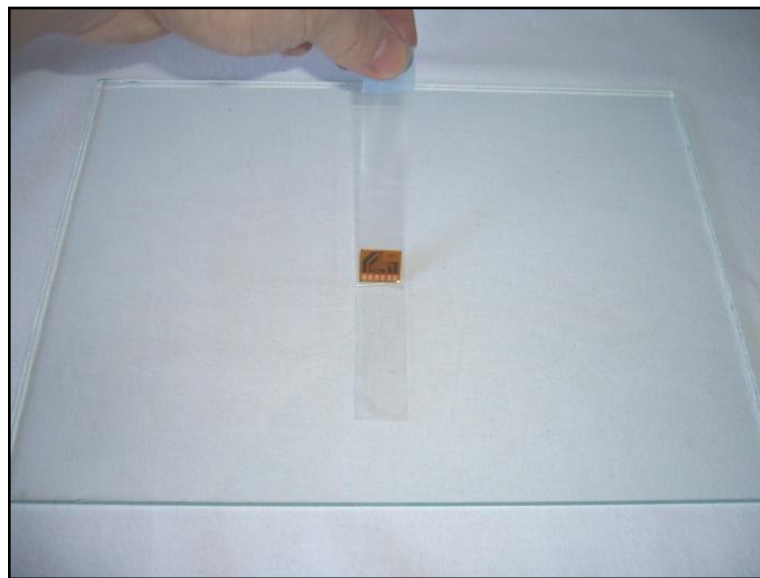


Abbildung 16: Dehnungsmesstreifen und Applikationsklebeband

Jetzt muss der DMS auf der Probe positioniert werden. Es müssen die Positionierungslinien mit den Positionierungsmarken auf dem DMS übereinstimmen (siehe Abbildung 13, Seite 25).

Nun ist das Klebeband vorsichtig von der Probe zu lösen. Dabei wird das Klebeband im flachen Winkel abgezogen bis der DMS sich von der Probenoberfläche gelöst hat und weitere 13 mm zur Sicherheit [18]. Dann ist das Klebeband wie in Abbildung 17 (Seite 31) zu positionieren und auf die Unterseite des DMS wird mit M-Bond 200 Katalysator eine dünne, gleichmäßige Schicht mit einem Pinselstrich aufgetragen (siehe Abbildung 18, Seite 31).



Abbildung 17: Positionierung vor dem Klebevorgang

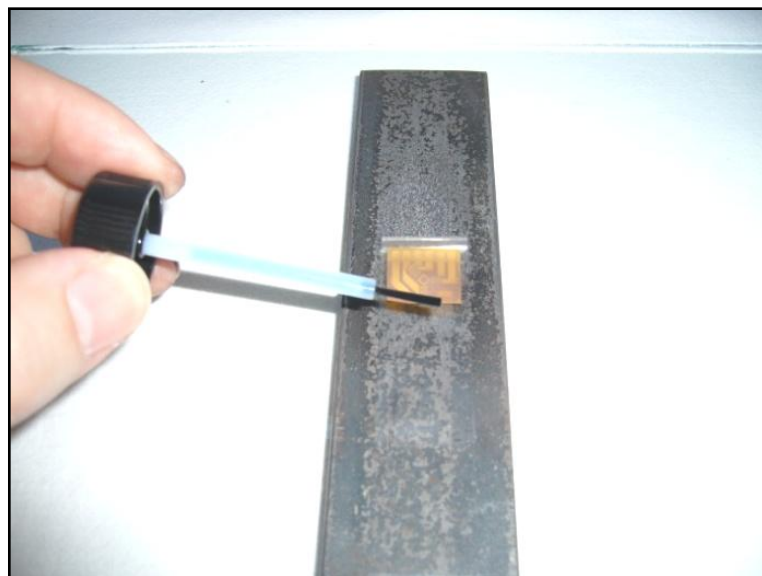


Abbildung 18: Auftragen des M-Bond 200 Katalysators

Der Katalysator muss bei Raumtemperatur mindestens 1 min trocknen.

Achtung: Folgende drei Schritte müssen innerhalb von drei bis fünf Sekunden ausgeführt werden [18]. Das umgelegte Klebebandende ist mit einer Hand hochzuhalten. Mit der anderen Hand sind zwei Tropfen des M-Bond 200 Klebers auf die Probenoberfläche im Grenzbereich des Klebebandes aufzubringen (siehe Abbildung 19, Seite 32).



Abbildung 19: Auftragen des M-Bond 200 Klebstoffes

Nach Auftragen des M-Bond 200 Klebers ist das Klebeband, wie in Abbildung 20 gezeigt, in einem Winkel von 30° über die Installationsfläche zu halten. Bei straffgezogenem Klebeband wird mit einem GAZE-Tupfer in einer einzigen Bewegung über das Klebeband/den DMS gestrichen [18].



Abbildung 20: Dehnungsmessstreifen mit Probe verbinden

Jetzt muss der DMS mit einem festen Daumendruck für mindestens eine Minute (bei Raumtemperatur) angepresst werden (siehe Abbildung 21, Seite 33) [18].



Abbildung 21: Anpressen des DMS mit festem Daumendruck

Nach weiteren zwei Minuten kann das Klebeband vorsichtig unter einem Winkel von 5° abgezogen werden (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Entfernen des Applikationsklebebandes

3.2.3 DMS mit P3 Strain Indicator verbinden

Im ersten Schritt sind drei gleich lange Stücke (ca. 50 cm bei einer Versuchsdurchführung, bei mehreren Versuchen entsprechend länger) vom PVC-

Flachbandkabel 330-DFV abzutrennen. Bei mehreren Messungen muss das Kabelende des DMS getrennt, aufgesplittet und neu verzinkt werden (siehe Abbildung 24). Das Kabelende zum P3 Strain Indicator kann unverändert angeschlossen bleiben.

Hinweis: Bei mehreren Versuchen ist die Anzahl der Bohrlöcher, die gefräst werden müssen, gemeint.

Es ist jeweils ein Kabelende in drei Einzeldrähte auf eine Länge von 5 cm aufzusplitten und ca. 1 cm vom Kabel abzuisolieren (siehe Abbildung 23). Dazu ist mit dem LötKolben die Isolierung zu schmelzen. Dies verhindert eine Beschädigung der Litze. Anschließend ist die Litze einzudrehen [21].

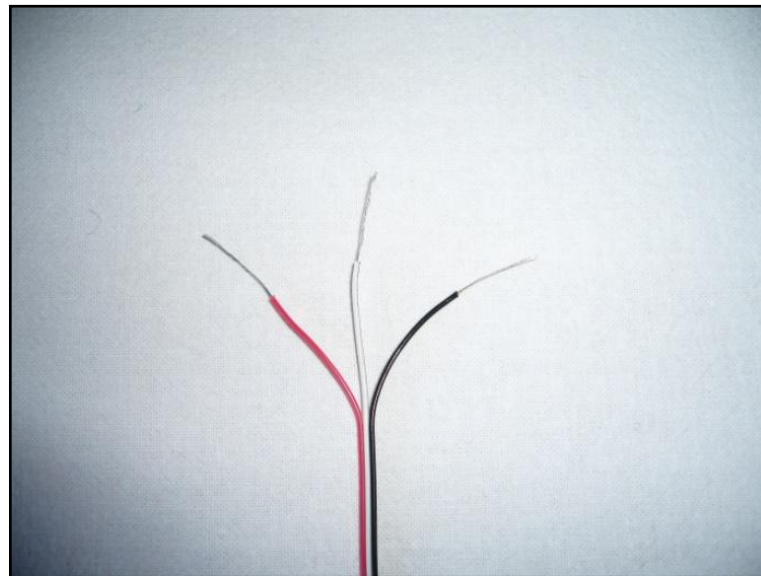


Abbildung 23: Aufsplittung des PVC-Flachbandkabels

Anschließend sind die Drahtenden mit dem Flussmittel M-Flux AR-2 zu benetzen und mit der Lötzinnschmelze 361A-20R zu verzinnen [21].

Das andere Drahtende wird ca. 2 cm abisoliert. Beim Eindrehen der Litze ist darauf zu achten, dass das rote Kabel einzeln und das schwarze mit dem weißen Kabel eingedreht wird (siehe Abbildung 24, Seite 35). Danach sind die Kabelenden zu verzinnen und auf ca. 5 mm zu kürzen [3].

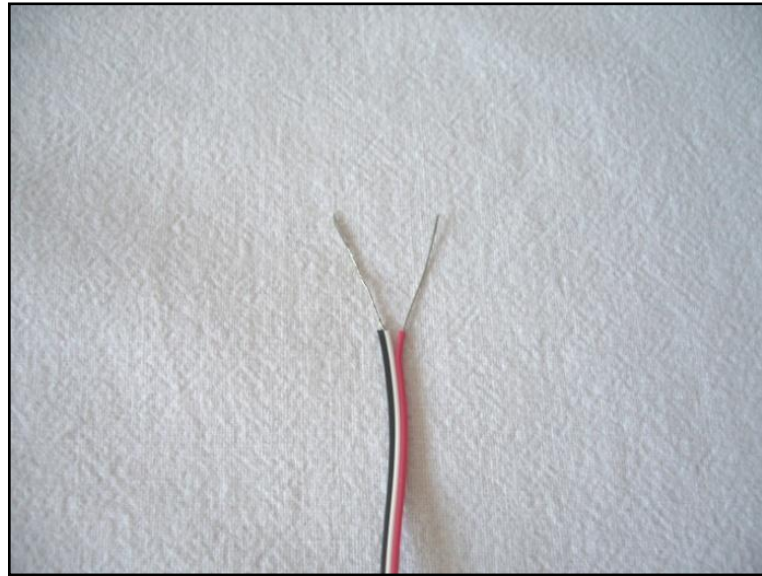


Abbildung 24: Kabelende zum Dehnungsmessstreifen

Jetzt sind die Anschlussfahnen am DMS mit dem M-Flux AR-2 zu benetzen. Danach ist ein kleiner Lötspunkt zu setzen. Anschließend ist das PVC-Flachbandkabel mit den Drahtenden auf den Lötspunkt, wie in Abbildung 25 zu sehen, zu setzen und mit einem weiteren Lötspunkt zu verbinden. Beim Löten hat es sich als sinnvoll erwiesen, das PVC-Flachbandkabel mit einem Klebestreifen zu fixieren [21].

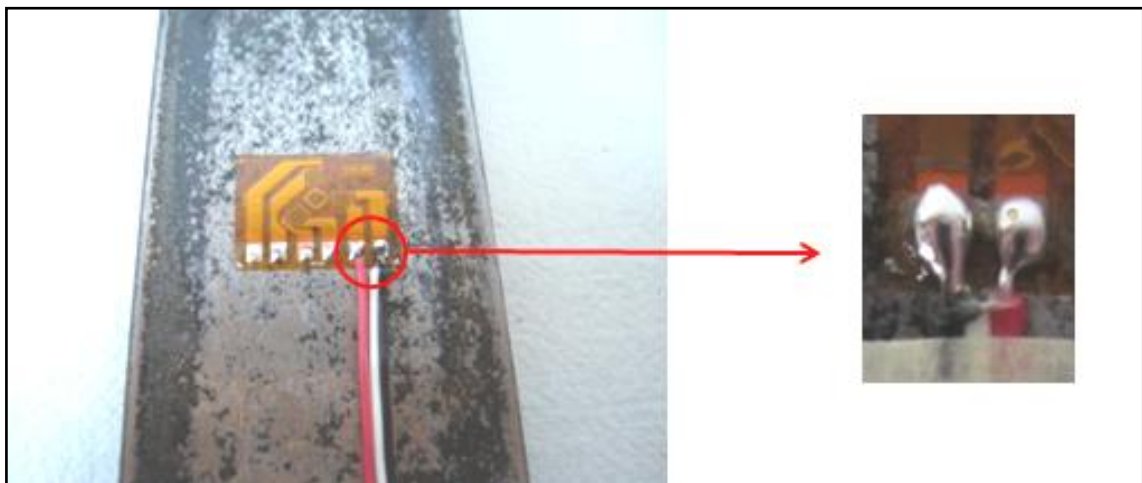


Abbildung 25: Verbindung PVC-Flachbandkabel mit Dehnungsmessstreifen

Der Vorgang muss mit den beiden anderen Kanälen wiederholt werden.

Anschließend ist eine Entlastungsschleife, wie in Abbildung 26 (Seite 36) zu sehen, zu legen [21].

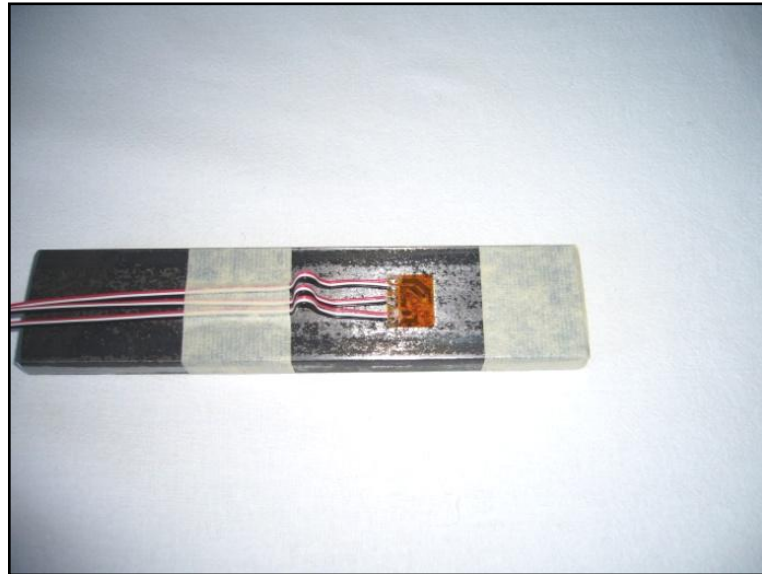


Abbildung 26: DMS mit Entlastungsschleife

Nachfolgender Schritt ist die Säuberung der Fläche zwischen beiden Klebebändern mit M-Line Rosin Solvent [21]. Im letzten Schritt sind die anderen Kabelenden noch mit dem P3 Strain Indicator zu verbinden (siehe Abbildung 29):

- Kanal 1: Linker Lötpoint am DMS (siehe Abbildung 27)
- Kanal 2: Mittlerer Lötpoint am DMS (siehe Abbildung 27)
- Kanal 3: Rechter Lötpoint am DMS (siehe Abbildung 27)

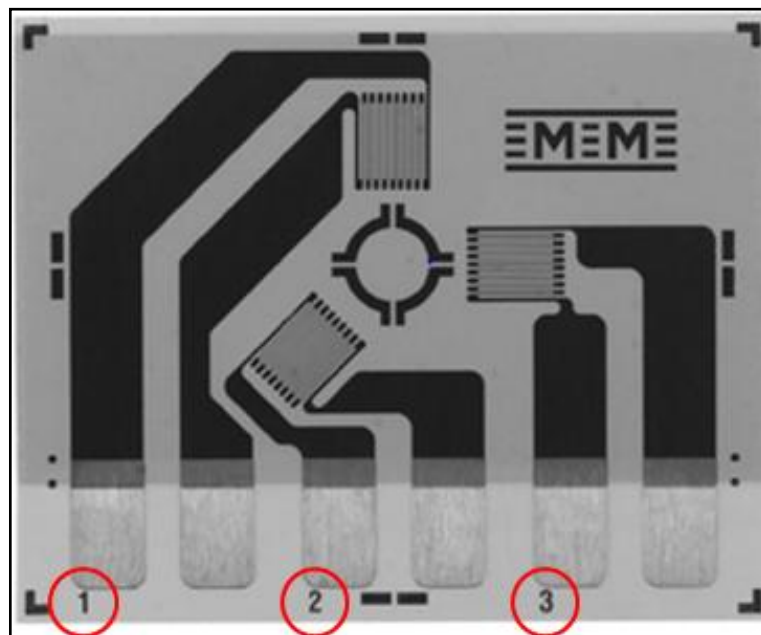


Abbildung 27: Kanalbelegung am DMS

Quelle: [4]

- rotes Kabel mit P+ verbinden (siehe Abbildung 28)
- schwarzes Kabel mit S- verbinden (siehe Abbildung 28)
- weißes Kabel mit D 120 verbinden (siehe Abbildung 28)



Abbildung 28: Detailaufnahme Kabelanschluss am P3 Strain Indicator

Abbildung 29 zeigt die Gesamtansicht des Anschlusses:

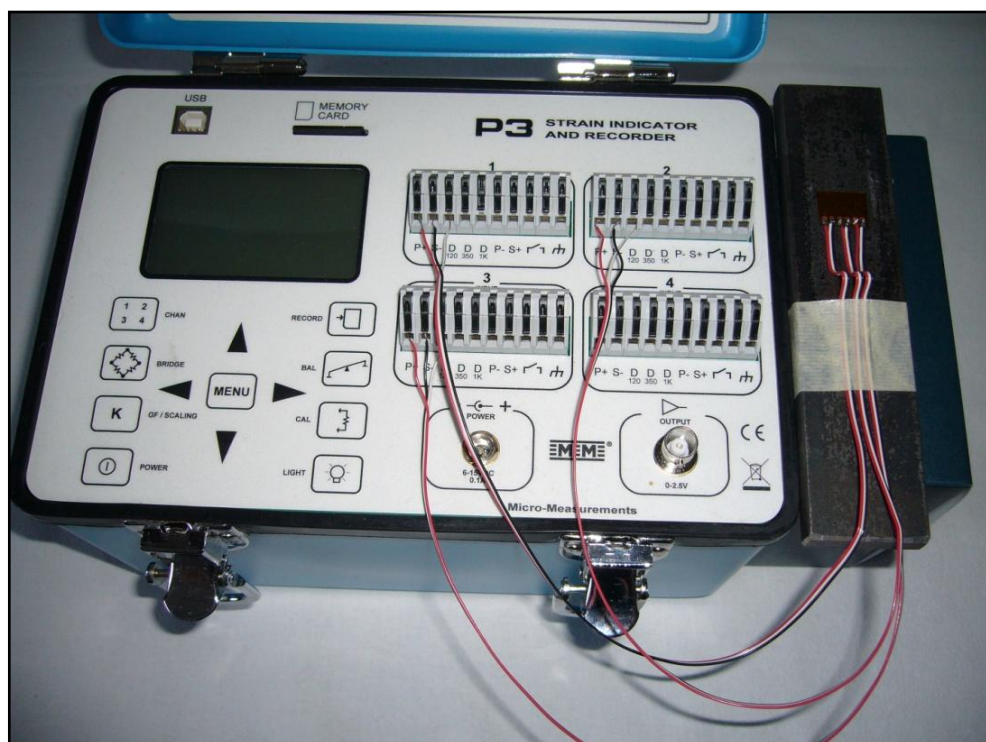


Abbildung 29: Anschluss des DMS an den P3 Strain Indicator

3.2.4 Konfiguration P3 Strain Indicator

Der P3 Strain Indicator ist eine Dehnungsmessbrücke mit Datenspeicher und findet Anwendung in der Widerstandsmessung von DMS. Der P3 besitzt vier Kanäle, an denen die DMS wahlweise mit Viertel-, Halb-, und Vollbrückenschaltungen angeschlossen werden können. Bei den durchgeführten Versuchen zur Eigenspannungsmessung wird die Wheatstonesche Brückenschaltung als 3-Leiter-Viertelbrücke verwendet. Die Vorteile der 3-Leiterschaltung (siehe Abbildung 30) zeichnet sich durch einen wirklichen Brückenausgleich aus und sorgt für eine automatische Kompensation von Temperatureinwirkungen auf die Brückenverdrahtung. Eine erhöhte Messempfindlichkeit im Vergleich zur 2-Leiterschaltung erzielt genauere Messwerte und ist somit für statische Dehnungen besonders geeignet [22].

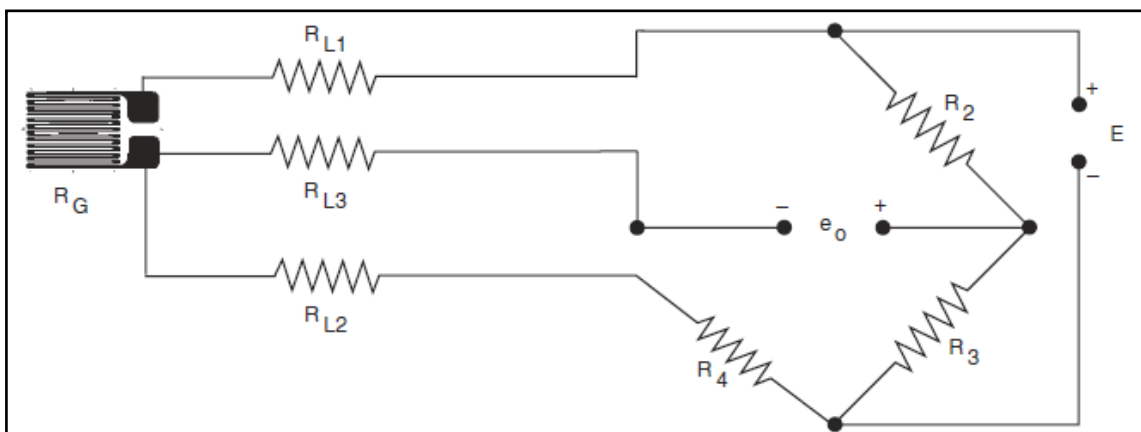


Abbildung 30: 3-Leiter-Viertelbrückenschaltung

Quelle: [22]

Viertelbrücken kommen immer dann zum Einsatz, wenn ein einzelner aktiver DMS pro Kanal angeschlossen wird und Zug- oder Druckspannungen ermittelt werden sollen [20]. Ein weiterer Vorteil der Dehnungsmessbrücke ist die präzise Brückenversorgung und die genaue k-Faktor Einstellung. "Der k-Faktor ist das Maß für die Dehnungsempfindlichkeit oder das Ausgangssignal, das in einem Widerstands-DMS generiert wird" [12]. Der k-Faktor ist das Verhältnis von $\frac{dR}{R_0}$ zu $\frac{dL}{L}$, wobei R_0 der Initialwiderstand des DMS vor der Dehnung ist (siehe auch Kapitel 3.2.2, Seite 28). Durch das Berücksichtigen des k-Faktors sind hochge-

naue Messungen mit ± 0.1 % Genauigkeit und $1\mu\text{m/m}$ Auflösung möglich [12]. Die Konfiguration des P3 Strain Indicators besteht aus fünf Menüpunkten. Mittels Cursortasten ist es möglich, sich im Menü zu bewegen. Mit der Menütaste kehrt man ins Hauptmenü zurück [20].

Folgende Konfiguration wurde für den Versuch hinterlegt:



1. CHAN:

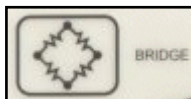
Channel 1: Active

Channel 2: Active

Channel 3: Active

Channel 4: Inactive

Unter dem Menüpunkt "Channel" werden die einzelnen Messkanäle ein- bzw. ausgeschaltet.



2. BRIDGE:

Ch 1: Undef HB/QB

Ch 2: Undef HB/QB

Ch 3: Undef HB/QB

Ch 4: Undef HB/QB

Unter dem Menüpunkt "Bridge" wird die 3-Leiter-Schaltung eingestellt.



3. GF/SCALING:

Chan: 1

Units: $\mu\epsilon$

Gage Factor: 2,070

Chan: 2

Units: $\mu\epsilon$

Gage Factor: 2,065

Chan: 3

Units: $\mu\epsilon$

Gage Factor: 2,070

Unter dem Menüpunkt "Gage Faktor/Scaling" sind die jeweiligen Gage-Faktoren der DMS und die zu messenden Einheiten einzustellen.

Achtung: Die Gage-Faktoren sind auf der Rückseite der Verpackung der DMS zu finden.



4. BAL:

Ready to Auto Balance → BAL drücken
→ RECORD drücken, um zu speichern.
Jetzt sollten alle Werte Null anzeigen.

Unter dem Menüpunkt "Balance" wird ein Nullabgleich aller aktiven Kanäle durchgeführt.



5.RECORD:

Mode: Disabled

Achtung: Um die Messwerte speichern zu können, muss mit der "Pfeil rechts-Taste" auf

Mode: Manual

Chan 1: On

Chan 2: On

Chan 3: On

Chan 4: Off gestellt werden.

Um Recording zu beenden: Menü → "Pfeil unten" bis Recording → Menü → "Pfeil links" bis Mode: Disabled → Menü.

Unter dem Menüpunkt "Record" ist es möglich, die Messwerte zu speichern.

3.3 Aufbau der Bohrvorrichtung

3.3.1 Montage der Bohrvorrichtung

Im ersten Schritt ist das Grundgestell auf ebener Fläche durch Verstellen der drei Fußschrauben so zu positionieren, dass die Grundplatte parallel zur aufstehenden Fläche ist. Als Richtwert sind 5 cm zwischen der Oberkante der Grundplatte und der aufstehenden Fläche zu empfehlen (siehe Abbildung 31). Nach der Ausrichtung sind die Schrauben mittels Rändelmuttern gegen Verdrehen zu sichern.

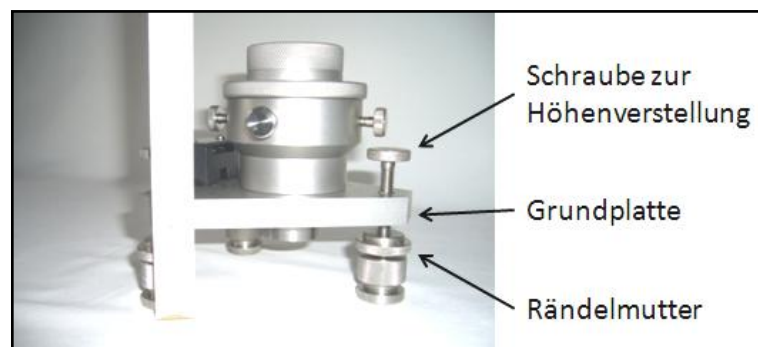


Abbildung 31: Höhenjustierung der Bohrvorrichtung

Nun ist die Beleuchtungseinheit seitlich anzubringen sowie der Anti-Rotations-Adapter aufzusetzen und mittels Rändelmutter zu fixieren (siehe Abbildung 32) [19].

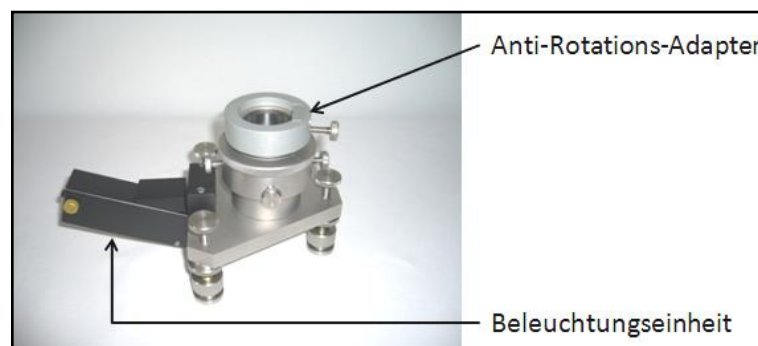


Abbildung 32: Montage der Beleuchtung und des Anti-Rotations-Adapters

Jetzt ist die Tiefenverstellung aufzusetzen (siehe Abbildung 33) [19].

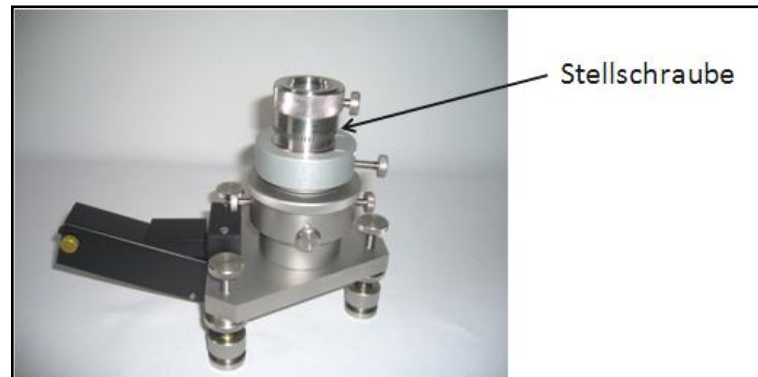


Abbildung 33: Aufsetzen der Stellschraube

Nun ist der Fräser mit 1,6 mm Durchmesser an der Turbine zu befestigen. Es ist darauf zu achten, dass der Fräser mit dem Schaft bis zum Anschlag in die Aufnahme der Turbine eingeschoben wird [6]. Beim Eindrücken des Fräfers ist zu beachten, dass dieser keiner Biegebeanspruchung unterlegen ist. Als Unterlage sollte Holz verwendet werden, um den Fräskopf nicht zu beschädigen (siehe Abbildung 34).

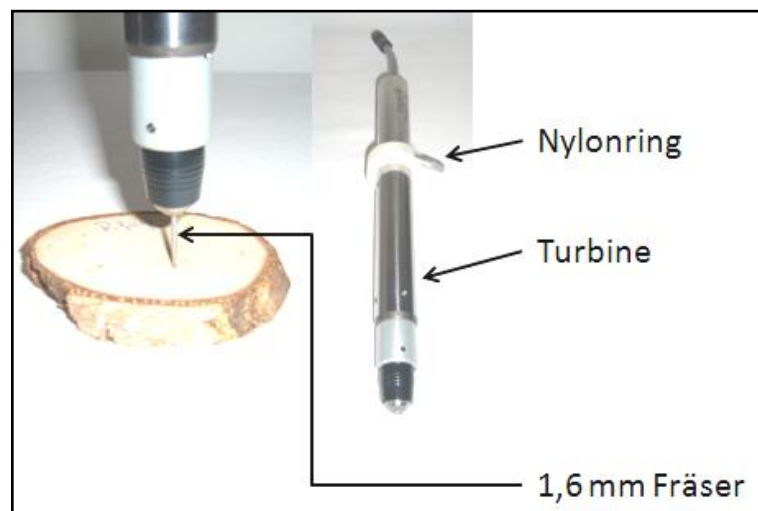


Abbildung 34: Montage des Fräfers

Im nächsten Schritt ist der Nylonring an der Turbine anzubringen (siehe Abbildung 34) und die Turbine ist soweit in die Vorrichtung einzuschieben, bis sich der Fräskopf ca. 1 mm oberhalb der Probenoberfläche befindet. Danach ist die Schraube zur Fixierung des Nylonringes zuzudrehen (siehe Abbildung 35, Seite 43) [19].



Abbildung 35: Turbine mit Nylonring einsetzen

Im letzten Schritt ist die Unterlegscheibe auf die Turbine zu stecken und anschließend die Federeinheit anzubringen (siehe Abbildung 36). Die Federeinheit wirkt den Prozesskräften entgegen und verhindert so eine Positionsveränderung der Turbine [19].

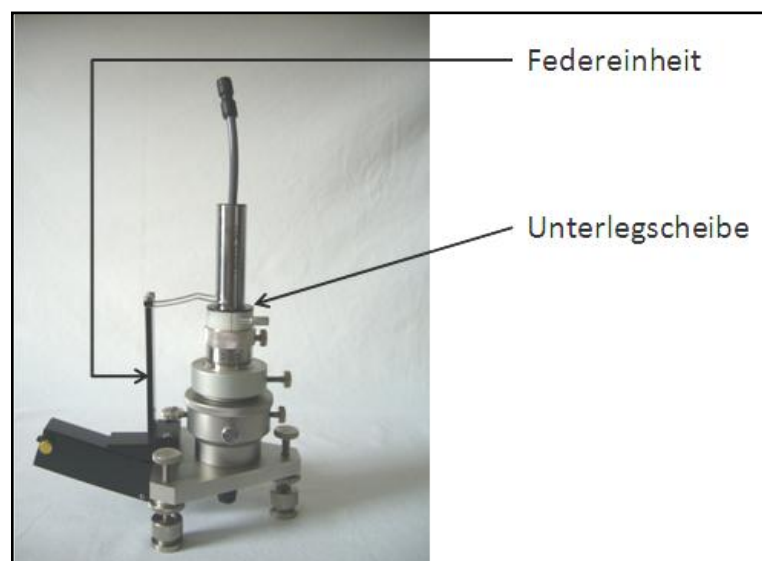


Abbildung 36: Montage der Federeinheit

3.3.2 Montage der Druckluftversorgung

Im ersten Schritt ist der 8 mm-PUR-Schlauch an die Schlauchtülle, die im Haus 5 der Hochschule Mittweida zur Druckluftversorgung zur Verfügung steht, anzuschließen (siehe Abbildung 37).



Abbildung 37: Kugelhahn für Druckluftzufuhr

Weiterhin ist der 8 mm-PUR-Schlauch mit der Luftaufbereitungseinheit (Grob- und Feinfilter, Wasser- und Ölabscheider, Luftdruckregulierer) zu verbinden (siehe Abbildung 38). Beide Anschlussseiten sind Steckverbindungen. Zum Lösen ist der schwarze Ring zu drücken und dabei ist an dem Schlauch zu ziehen.



Abbildung 38: Luftaufbereitungseinheit mit Druckluftzugang

Nun ist der transparente 6 mm-Schlauch zum einen mit der Luftaufbereitungseinheit (siehe Abbildung 39) und zum anderen mit dem Fußpedal (siehe Abbildung 40) zu verbinden. Zu beachten ist, dass der transparente Schlauch mit einem 16 mm-Schraubenschlüssel am Ventilanschluss "IN" und der blaue Schlauch an "OUT" angeschlossen und mit der Turbine per Steckverbindung (siehe Abbildung 41, Seite 46) verbunden wird.



Abbildung 39: Luftaufbereitungseinheit mit Druckluftabgang

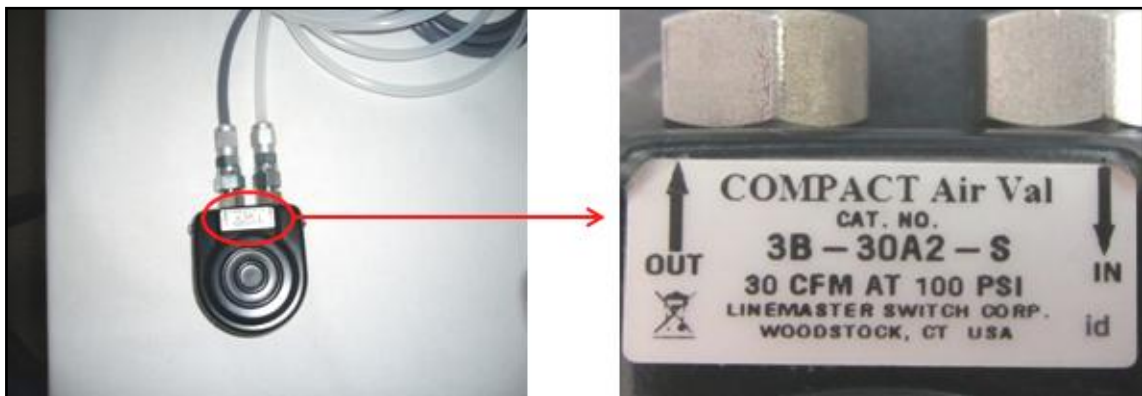


Abbildung 40: Fußpedal



Abbildung 41: Verbindung Druckluftzufuhr mit Turbine

3.3.3 Betriebsdruck einstellen

Anmerkung: Folgender Punkt bezieht sich ausschließlich auf die technischen Gegebenheiten im Raum 5-207A der Hochschule Mittweida.

Es ist das Drucklufthauptventil (siehe Abbildung 42) durch eine Drehung von 90° gegen den Uhrzeigersinn zu öffnen. Anschließend ist der Kugelhahn zu öffnen (siehe Abbildung 37, Seite 44).



Abbildung 42: Drucklufthauptventil

Jetzt ist das Fußpedal (siehe Abbildung 40, Seite 46) zu betätigen und an der Stellschraube der Luftaufbereitungseinheit (siehe Abbildung 39, Seite 46) ein Betriebsdruck von 3 bar einzustellen. Nach Einstellen des Betriebsdruckes ist durch Drücken der Stellschraube gegen erneutes Verstellen des Druckes zu sichern.

Anmerkung: Der gesamte Versuchsaufbau kann auch für einen mobilen Einsatz verwendet werden. Zur Druckluftversorgung muss wahlweise ein Kompressor bzw. eine Druckluftflasche mit Druckminderer bereitgestellt werden. Als Druckluftabgang ist eine 8 mm-Schnellkupplung, wie bei der Luftaufbereitungseinheit verwendet wird, zu installieren.

3.4 Versuchsdurchführung Fräsvorgang

3.4.1 Markieren und Ausrichten der Bohrvorrichtung

Für eine erste Grobausrichtung der Bohrvorrichtung ist die Schablone wie in Abbildung 43 aufzulegen und die Position der Bohrvorrichtung zu markieren. Bei Proben, die eine kleinere Grundfläche als die Schablone haben, ist es sinnvoll, die Probe auf der Grundplatte zu befestigen (z.B. Verwendung von doppelseitigem Klebeband oder einer mechanischen Spannvorrichtung) [19].

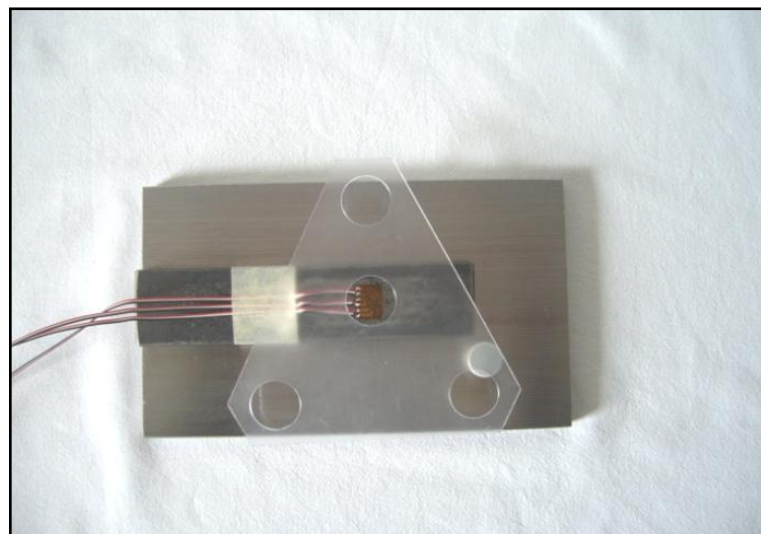


Abbildung 43: Auflegen der Bohrvorrichtungsschablone

Nachdem die Position der Bohrvorrichtung festgelegt wurde, ist diese aufzusetzen, ggf. auf der Grundplatte oder dem Bauteil zu befestigen und mit dem Mikroskop und der Beleuchtungseinheit zu bestücken. Darauffolgender Schritt ist, die Beleuchtung einzuschalten und das Mikroskop scharfzustellen. Jetzt ist eine Feinausrichtung des Bohrlochzentrums durch die optische Kontrolle mittels Fadenkreuz (siehe Abbildung 44 rechts) im Mikroskop und den vier Positionierungsschrauben notwendig (siehe Abbildung 44 links). Jetzt kann die Mutter, auf der der Anti-Rotations-Adapter sitzt, festgezogen werden [19].

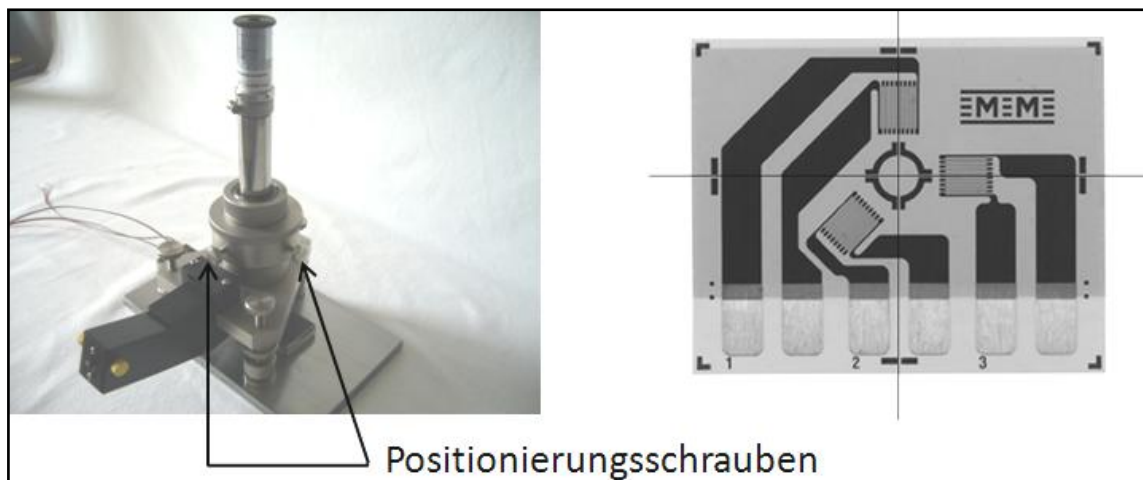


Abbildung 44: Feinjustierung der Bohrvorrichtung

3.4.2 Vorbereitung des Fräsvorganges

Zunächst ist die Turbine, die Stellschraube und der Anti-Rotations-Adapter wieder zu entfernen. Die Dicke des DMS muss berücksichtigt werden, um einen korrekten Nullpunkt bestimmen zu können. Gelöst wird das Problem, indem man den 1,6 mm-Fräser aus dem Röhrchen mit der roten Kappe (siehe Abbildung 45) in die Welle für den Bohrmaschinenantrieb einsetzt und mit dem Gewindestift (Madenschraube) fixiert (siehe Abbildung 46, Seite 49).



Abbildung 45: 1,6 mm-Fräser



Abbildung 46: Welle für Bohrmaschinenantrieb

Nun wird die Welle vorsichtig in die Bohrvorrichtung gesetzt bis der Fräskopf auf dem DMS aufliegt und eine Umdrehung ohne Druck gedreht. Das Eigengewicht reicht aus, um die Dicke des DMS abzuschälen. Jetzt ist die Welle herauszunehmen und die Druckluftturbine einzusetzen.

Die Stellschraube ist, wie in Abbildung 47 (Seite 50) zu sehen, auf Null zu stellen und zu fixieren. Durch Öffnen des Nylonringes kann jetzt die Turbine bis auf die Probenoberfläche herabgesenkt werden. Dann ist der Nylonring wieder anzuziehen.



Abbildung 47: Nullpunktsetzung

Da der Fräser beim Starten des Fräsvorganges nicht die Probenoberfläche berühren sollte, ist die Stellschraube um 0,5 mm im Uhrzeigersinn (siehe Abbildung 48, Seite 51) zu drehen, um den Fräser von der Probenoberfläche abzuheben. Die Skalierung der Stellschraube beträgt je markiertem Zahlenwert 0,1 mm.



Abbildung 48: Position der Stellschraube vor dem Fräsvorgang

3.4.3 Der Fräsvorgang

Achtung! Noch einmal ist die Anzeige am P3 Strain Indicator zu kontrollieren, ob die DMS der drei Kanäle auf Null stehen. Ist dies nicht der Fall, so muss unter 3.2.4 Konfiguration P3 Strain Indicator der Punkt 4 "BAL" erneut ausgeführt werden.

Jetzt muss unter 3.2.4 Konfiguration P3 Strain Indicator der Punkt 5 "Record" → "Pfeil rechts" → "Manual" gestellt werden, damit die Messwerte manuell gespeichert werden können. Zur Sicherheit sollten die Messwerte zusätzlich von Hand notiert werden. Eine Tabelle zum Notieren der Frästiefen mit den jeweiligen Dehnungen ist dem Anhang A zu entnehmen.

Durch Betätigen des Fußpedals versetzt sich die Turbine in Bewegung und die Stellschraube kann langsam bis auf 0,0 mm gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden.

Nun ist durch Drücken der "Record"-Tasten der erste Messpunkt (Dehnungen 0,0 mm für Kanal 1, 2 und 3) zu speichern.

Folgender Ablauf ist bei jeder Zustellung der Frästiefe abzuarbeiten:

- Fußpedal aktivieren
- Stellschraube bis auf z.B. 0,02 mm zustellen
- Stellschraube bis auf z.B. 0,00 mm zurückdrehen
- Fußpedal deaktivieren
- Messpunkt speichern durch Drücken der "Record"-Taste und per Hand notieren

Nächste Zustellung der Tiefe:

- Fußpedal aktivieren
- Stellschraube bis auf z.B. 0,04 mm zustellen
- Stellschraube bis auf z.B. 0,02 mm zurückdrehen
- Fußpedal deaktivieren
- Messpunkt speichern durch Drücken der "Record"-Taste und per Hand notieren

Nächste Zustellung der Tiefe:

- Fußpedal aktivieren
- Stellschraube bis auf z.B. 0,06 mm zustellen
- Stellschraube bis auf z.B. 0,04 mm zurückdrehen
- Fußpedal deaktivieren
- Messpunkt speichern durch Drücken der "Record"-Taste und per Hand notieren

...USW.

Dieser Ablauf ist bis zur gewünschten Tiefe zu wiederholen.

Dieser Vorgang kann aber auch vorzeitig beendet werden, wenn keine Dehnungsveränderungen mehr gemessen werden.

Um Recording zu beenden: Menü → "Pfeil unten" bis Recording → Menü → "Pfeil links" bis Mode: Disabled → Menü (siehe unter 3.2.4 Konfiguration P3 Strain Indicator der Punkt 5 "Record").

Nach erfolgreichem Fräsvorgang ist der Durchmesser des Bohrloches zu vermessen. Der Bohrlochdurchmesser wird zur Auswertung (siehe Kapitel 3.5.2)

benötigt. Die Turbine ist durch das Mikroskop in der Bohrvorrichtung auszutauschen. Auf einer Achse im Fadenkreuz des Mikroskopes befindet sich eine Einteilung zur Vermessung des Bohrlochdurchmessers.

Zur Berechnung des Bohrlochdurchmessers sind folgende Kenntnisse notwendig:

- 1 DIV = ein Strich auf der Achse
- 100 DIV = 0,161 Zoll = 4,0894 mm

Zum besseren Verständnis soll folgende Beispielrechnung beitragen:

geg.: 44 DIV (auf Achse abgelesen)

ges.: Bohrlochdurchmesser

Lösung:

$$44 \text{ DIV} \cdot 0,161 \text{ Zoll} / 100 = \underline{0,07084 \text{ Zoll}}$$

Nun sind die 0,07084 Zoll in mm umzurechnen.

$$0,07084 \text{ Zoll} \cdot 25,4 \text{ mm} = \underline{1,799336 \text{ mm}}$$

Alternativ können die Bohrlöcher auch an einem Stereomikroskop vermessen werden.

3.5 Versuchsauswertung

3.5.1 Die Integralmethode

Mit Hilfe der Integralmethode ist es möglich, die Eigenspannungen über einen Tiefenverlauf recht gut zu erfassen. Dabei wird ein Sackloch schrittweise in die Tiefe gebohrt und dabei werden die Dehnungsdifferenzen bei jedem Tiefeninkrement erfasst. Durch die Bohrung baut sich ein dreidimensionales Dehnungsfeld auf, infolgedessen lässt sich der Spannungs- und Dehnungszustand an der Oberfläche nicht mehr analytisch berechnen. Die Einführung von geometrieab-

hängigen Koeffizienten wurde notwendig. Diese mussten mittels empirischer Versuche bestimmt werden. Bei der Berechnung der Eigenspannung mit dem Programm H-Drill werden diese Koeffizienten einbezogen. Weiterhin besteht eine geometrische Abhängigkeit zwischen der Bohrlochtiefe und dem Bohrl Lochdurchmesser in Hinsicht auf die Änderungsrate der Dehnungen an der Oberfläche [13]. Untersuchungen von Rendler und Vigness haben gezeigt, dass ab dem Verhältnis Bohrlochtiefe Z zu Rosettenkreisdurchmesser D , $Z/D = 0,4$ die Dehnungen zu 100% normalisiert sind (siehe Abbildung 49) [9].

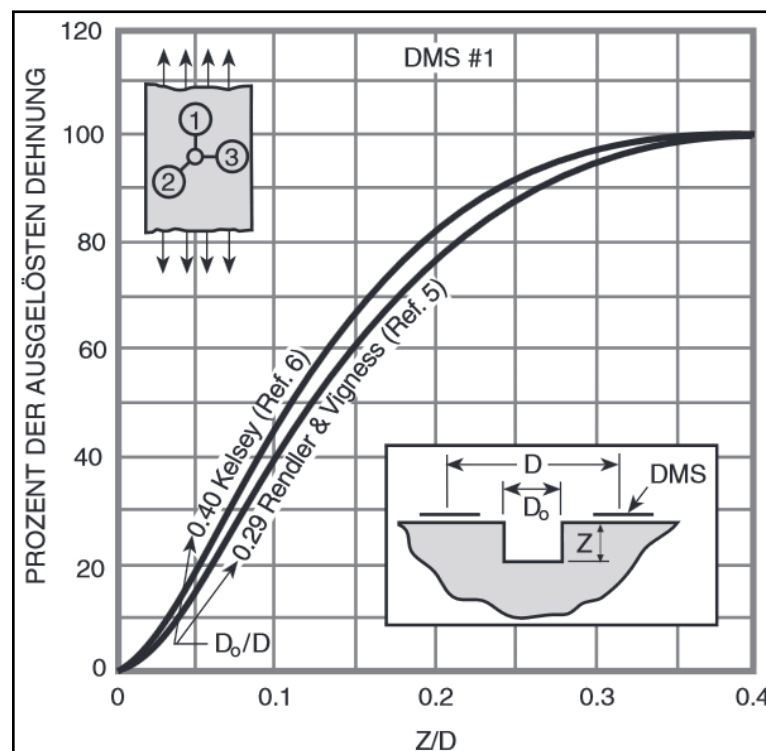


Abbildung 49: Ausgelöste Dehnung als Funktion des Verhältnisses Z/D

Quelle: [9]

3.5.2 Messwerte importieren und auswerten

Am Beispiel einer Magnesiumprobe soll in diesem Punkt die Spannungsauswertung mit dem Programm H-Drill beschrieben werden. Die Messwerte sind als TXT-Datei auf der SD-Karte abgespeichert. Die Dateien sind entweder per SD-Karte, die im P3 integriert ist, oder über das beiliegende USB-Kabel auf den PC zu kopieren.

Danach ist das Programm "H-Drill" zur Datenauswertung zu starten (siehe Abbildung 50).



Abbildung 50: Icon H-Drill

Nun sollte im Programm auf das metrische Einheitensystem umgestellt werden. Unter dem Menüpunkt "File" → "New" ist der Punkt "Metric" mit "OK" zu bestätigen (siehe Abbildung 51).

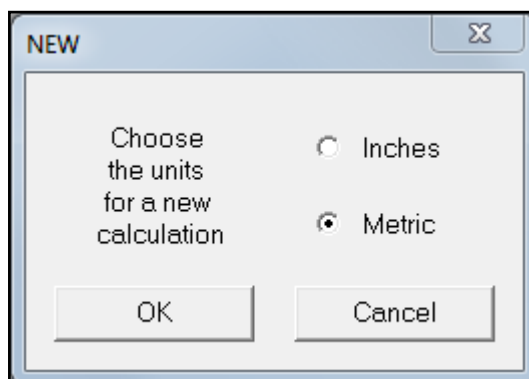


Abbildung 51: Auswahl des Einheitensystems

Weiterhin müssen die Material- und Geometriedaten in das Programm eingetragen werden. Unter dem Menüpunkt "Blind-Hole" → "Specify Material and Geometry" öffnet sich ein neues Fenster (siehe Abbildung 52, Seite 56). Hier ist der Rosettentyp 062 UL auf der linken Seite des Fensters sowie der Elastizitätsmodul, die Poisson-Konstante, der gemessene Bohrlochdurchmesser und die Streckgrenze auf der rechten Seite anzugeben. Das Fenster ist mit "OK" zu bestätigen.

H-DRILL -- Material and Geometry Data

Data Title: Data Title

Rosette Type

- ☐ 031 RE
- ☐ 062 RE
- ☐ 125 RE
- ☐ 062 UM
- ☒ 062 UL
- ☐ 030 RR
- ☐ FAER-03S

Young's Modulus, GPa: 42

Poisson's Ratio: 0.300

Std. Modulus Error, %:

Hole Diameter, mm: 1.68

Std. Diameter Error, mm:

Yield Stress, MPa: 320

OK Cancel

Abbildung 52: Angabe von Material- und Geometriedaten (Beispiel Magnesium)

Im Programm öffnet sich ein Fenster zur Bestätigung der eingegebenen Daten. Unter dem Menüpunkt "Blind-Hole" → "Specify Blind-Hole Strains" öffnet sich ein neues Fenster, in das die gemessenen Werte aus der TXT-Datei mit den dazugehörigen Tiefen in die Tabelle per Hand eingetragen werden müssen (siehe Abbildung 53, Seite 57). Nach Fertigstellung der Eingabe ist dieses Fenster mit "OK" zu bestätigen.

H-DRILL -- Blind-Hole Strain Data

#	Depth mm	e1 ue	e2 ue	e3 ue
0.	0.000	0	0	0
1.	0.020	7	7	8
2.	0.040	8	8	10
3.	0.060	9	9	11
4.	0.080	9	9	12
5.	0.100	10	10	13
6.	0.120	10	10	14
7.	0.140	10	10	15
8.	0.160	11	11	16
9.	0.180	11	11	17

STRAINS

Std Strain Error, ue

☒ automatic

☐ user input

Std Depth Error, mm

☒ Auto depth entry

OK

Cancel

Abbildung 53: Eingabe der gemessenen Dehnungen

Im Programm öffnet sich ein Fenster zur Bestätigung der eingegebenen Daten.

Jetzt kann die Berechnung der Eigenspannungen über den Tiefenverlauf erfolgen. Unter dem Menüpunkt "Blind-Hole" → "Display Integral Method" werden die Berechnungen ausgeführt. Es öffnen sich eine Reihe von Fenstern, in denen die berechneten Spannungen und gemessenen Dehnungen (siehe Abbildung 54, Seite 58) als Zahlenwerte ausgegeben werden.

Abbildung 55 (Seite 58) zeigt die Dehnungen der drei Messgitter, welche über die Messtiefe aufgenommen wurden. Die Spannungen in X- und Y-Richtung über die Tiefe (siehe Abbildung 56, Seite 59) sowie die maximalen und minimalen Hauptspannungen über die Tiefe (siehe Abbildung 57, Seite 59) werden angezeigt.

Unter dem Menüpunkt "Blind-Hole" → "Save Results" können die Daten gespeichert, in EXCEL exportiert und weiterverarbeitet werden.

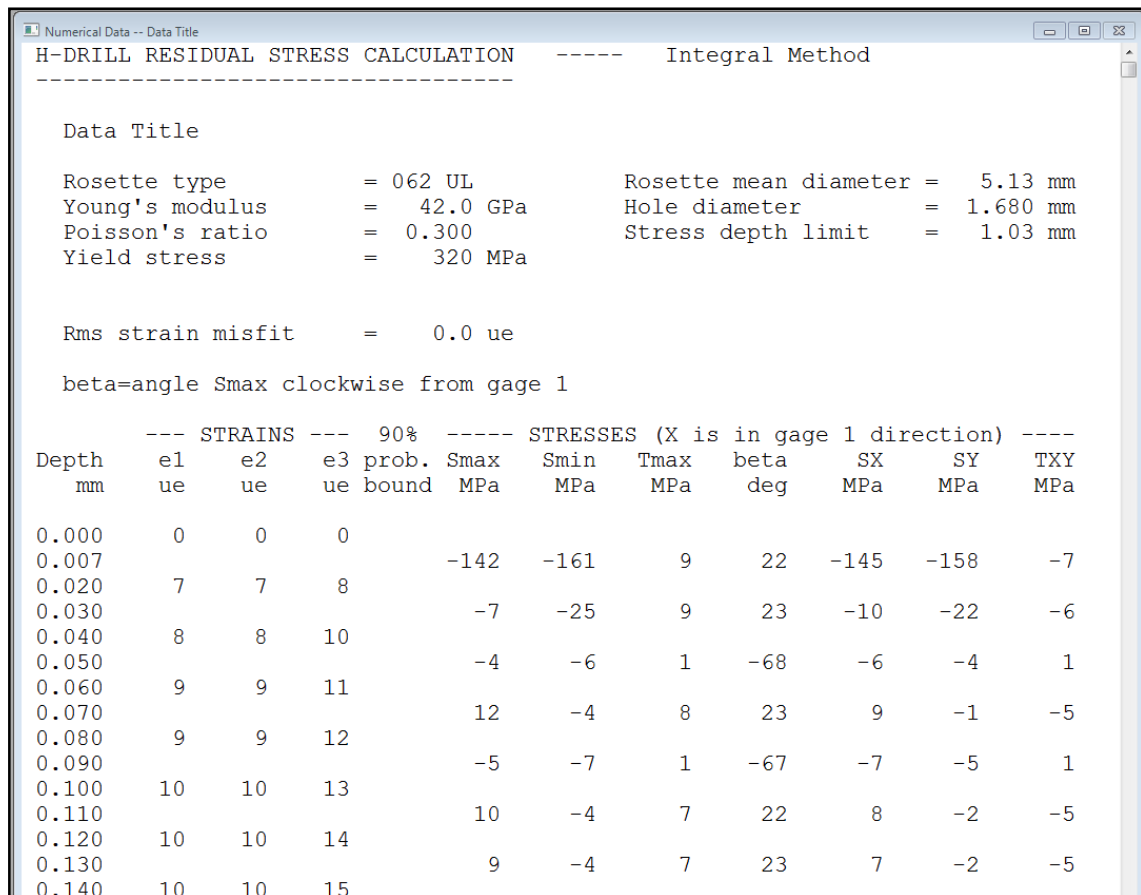


Abbildung 54: berechnete Zahlenwerte

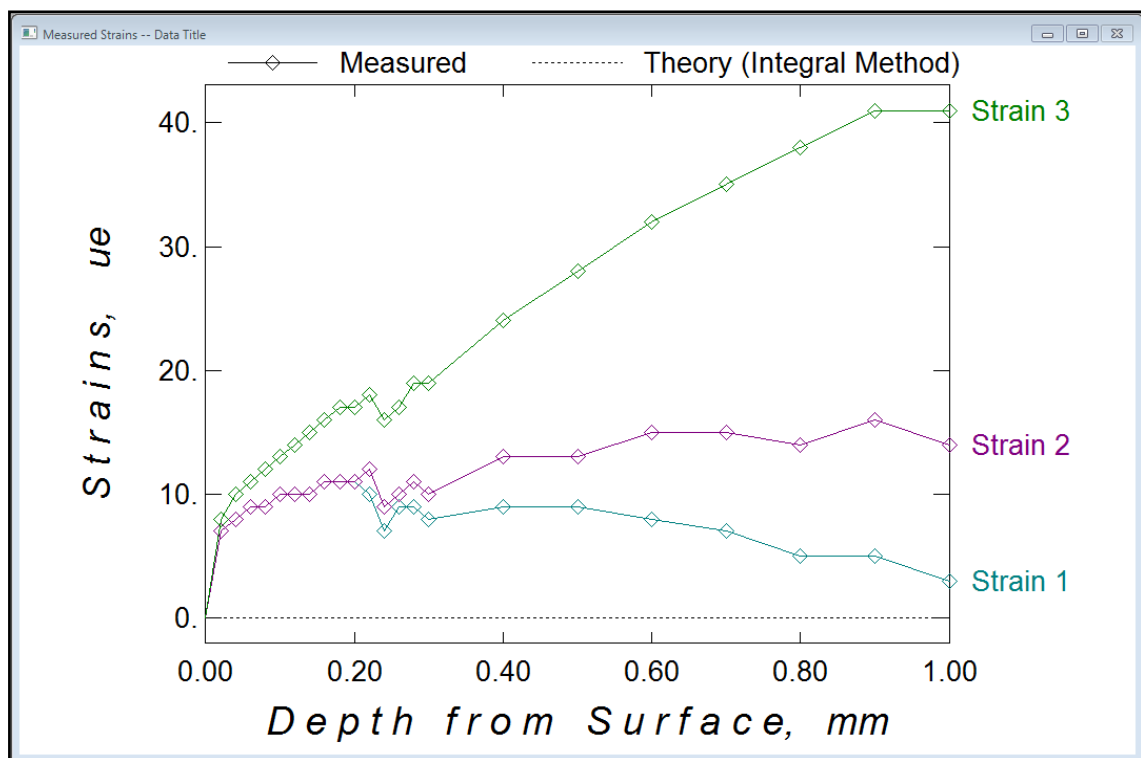


Abbildung 55: Dehnungs-Tiefen-Verlauf

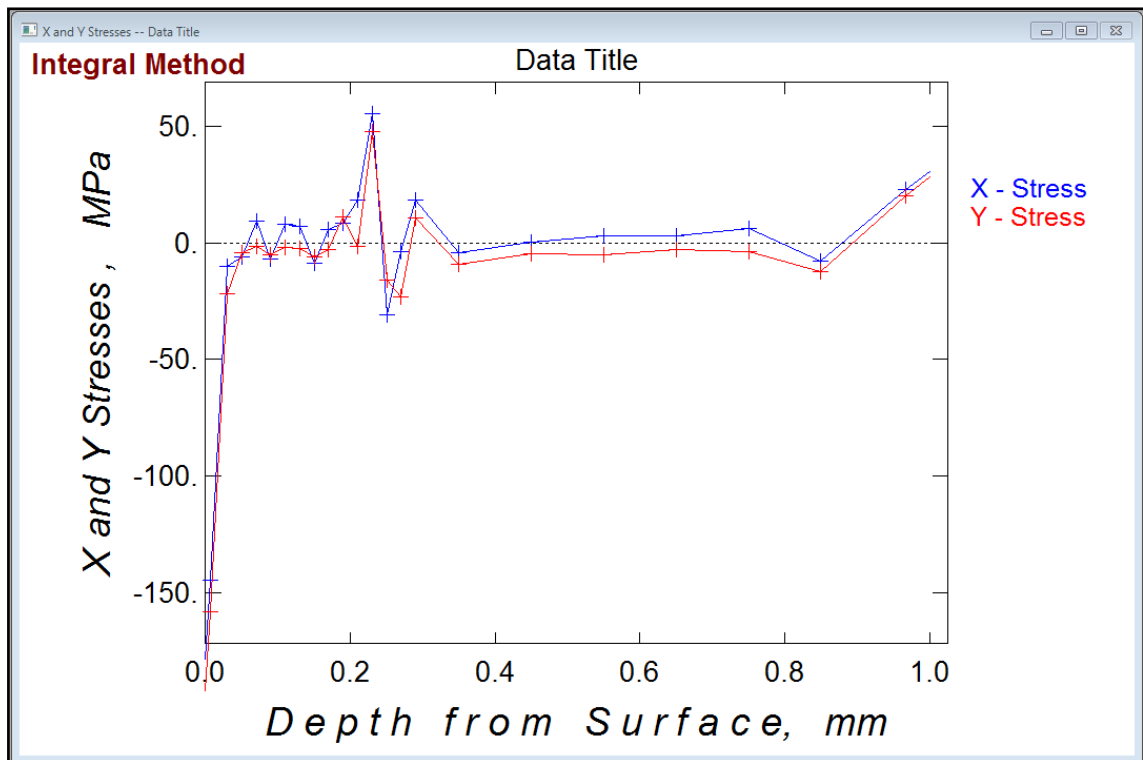


Abbildung 56: Spannungs-Tiefen-Verlauf in X- und Y-Richtung

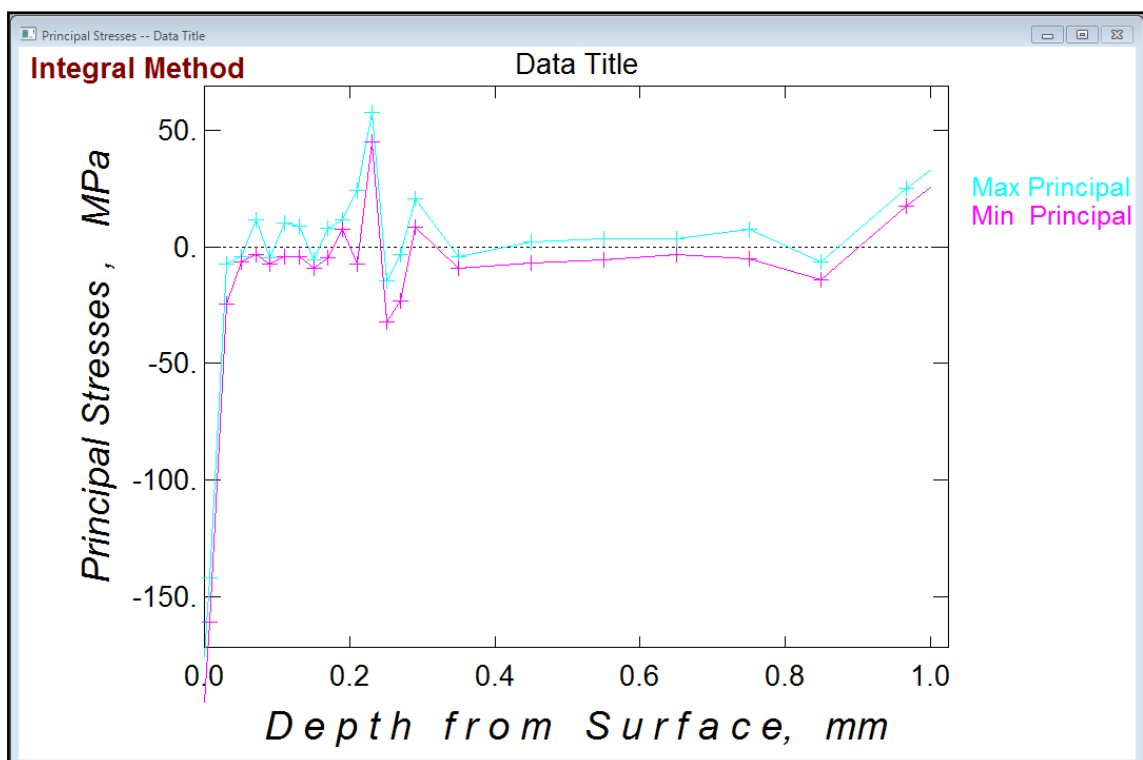


Abbildung 57: Tiefenverlauf max. und min. Hauptspannungen

4 Festwalzen der Proben

4.1 Allgemeines

Festwalzen ist ein mechanisches Verfahren zur Festigkeitssteigerung in Randschichten von Bauteilen, die einer besonders hohen dynamischen Belastung ausgesetzt sind. Die Kombination von drei physikalischen Effekten macht dieses Verfahren und die damit erzielten Ergebnisse sehr wirksam. Neben den Druckeigenspannungen, die in der Randschicht entstehen, kommt es auch zur Festigkeitssteigerung durch Umformeigenspannungen. Die Glättung der Oberfläche beseitigt zudem Mikrokerben im Bauteil. Daher wird das Festwalzen für folgende Anwendungsgebiete erfolgreich eingesetzt [23]:

- Materialermüdung bei zyklisch schwellender/wechselnder Last
- Kerbwirkung der Querschnittsänderung
- scharfkantige Übergänge und Bearbeitungsriefen
- Kerbwirkung, hervorgerufen durch mechanische Fertigungsprozesse
- Spannungsrisskorrosion

Wirtschaftlich zeichnet sich das Verfahren insofern aus, dass das Festwalzen als nachfolgender Bearbeitungsschritt ausgeführt werden kann. So kann zum Beispiel die Bearbeitung von Drehteilen mit derselben Werkzeugaufnahme der Drehmaschine genutzt werden. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens beruht auf nachfolgenden Fakten [23]:

- kurze Prozesszeit, schneller Auftragsdurchlauf
- keine Rüstzeit für Umspannen und Transport der Bauteile
- Investitionskosten gering, da vorhandene Maschinen genutzt werden

Der Nachteil des Verfahrens ist, dass es keine zuverlässige Methode zur zerstörungsfreien Prüfung des festgewalzten Werkstückes gibt [23]. Daher sind bei den Festwalzversuchen die von ECOROLL vorgegebenen Bearbeitungsparameter wie Vorschub und Walzkraft sowie die Position des Werkzeuges eingehalten worden.

4.2 Werkzeuge

Hydrostatisches Festwalzwerkzeug HGx-9

Das hydrostatische Festwalzwerkzeug HGx-9 der Fa. ECOROLL ist speziell zum Glatt- und Festwalzen von rotationssymmetrischen Flächen wie Kegel, Zylinder und Planflächen konzipiert worden. Auf CNC-Bearbeitungszentren können auch Freiformflächen mit mäanderförmigen Bewegungen abgefahren werden [24]. Das hydrostatische Festwalzwerkzeug HGx-9 (siehe Abbildung 58) ist mit einer Spannleiste zur Befestigung in Standardstahlhaltern für konventionelle und CNC-gesteuerte Drehmaschinen ausgerüstet.



Abbildung 58: Hydrostatisches Glattwalzwerkzeug HGx-9

Quelle: [25]

Für die Festwalzversuche kam das Festwalzwerkzeug HGx-9 in Verbindung mit dem Festwalzelement HG6 zum Einsatz. Das Festwalzelement HG6 besitzt eine 6 mm Hartstoffkugel. Diese ist hydrostatisch gelagert. In Verbindung mit dem Hydraulikaggregat HGP6.0 wird mit Kühlschmierstoff ein Druck bis zu 400 bar auf die Kugel aufgebracht. "Auf diese Weise wird die Walzkraft erzeugt, mit der die Kugel gegen die Werkstückoberfläche gedrückt wird. Hierdurch wird der

oberflächennahe Werkstoff plastifiziert und umgeformt. Die Kugel ist in ihrer hydrostatischen Lagerung praktisch reibungsfrei und allseitig beweglich" [24].

Das Hydraulikaggregat HGP6.0

Das Hydraulikaggregat HGP6.0 (siehe Abbildung 59) dient als Druckquelle zur Versorgung der hydrostatischen Werkzeuge.



Abbildung 59: Hydraulikaggregat HGP6.0

Quelle: [25]

Der Kühlschmierstoff befindet sich separat in einem Behälter mit einer Aufsatzpumpe, die den Kühlschmierstoff an das Hydraulikaggregat liefert. Weiterhin wird das Hydraulikaggregat mit dem Werkzeug durch einen Hochdruckschlauch verbunden.

Die Werkzeughalterung

Die Entwicklung der Werkzeughalterung ist das Resultat aus den Anforderungen, die beim Festwalzen eingehalten werden müssen. Zum einen soll eine konstante Vorschubgeschwindigkeit eingehalten werden und zum anderen soll eine exakte Positionierung des Werkzeuges zum Werkstück realisiert werden. Weiterhin war die genaue Zustellung der Spurbreite bei den Versuchen zwingend erforderlich. Da das vorhandene hydrostatische Festwalzwerkzeug HGx-

9 für das Anbringen an Drehmaschinen ausgelegt ist, galt es, eine Werkzeughalterung (siehe Abbildung 60) zu entwickeln, mit deren Hilfe eine Befestigung des Festwalzwerkzeuges an den Fräskopf einer konventionellen Kreuzbettfräsmaschine angebracht wurde.

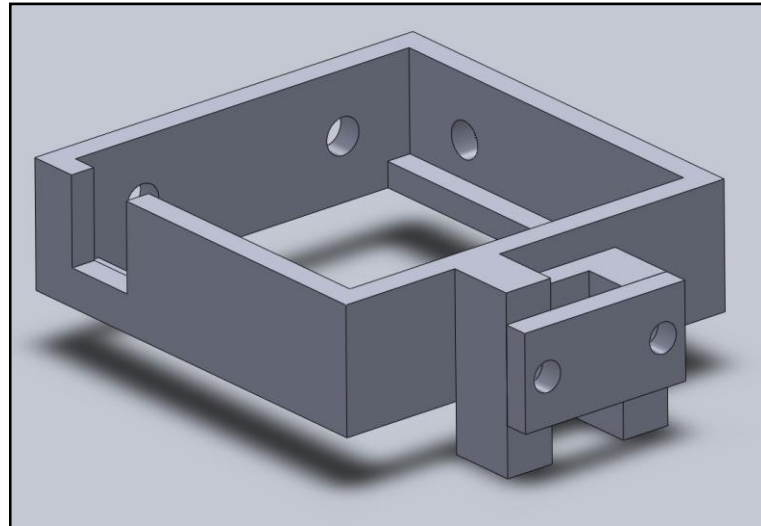


Abbildung 60: CAD-Modell Werkzeughalterung

Die Befestigung der Werkzeughalterung und des Festwalzwerkzeuges erfolgte kraft- und formschlüssig durch Verspannung mittels Schrauben.

4.3 Geometrie der Prüfkörper

Die Herstellung der Proben erfolgte durch mechanische Bearbeitung aus Rundprobenrohlingen, die für Schwingfestigkeitsuntersuchungen angefertigt wurden. Ein rechteckiger Querschnitt erwies sich als sinnvoll. So konnten die Prüfkörper für die Festwalzversuche sicher in der Spannbank fixiert werden. Allerdings galt zu beachten, dass die Breite der Probe nicht geringer ist als die Breite des DMS und dass die Probe hinreichend dick genug ist.

Aus den Rohlingen konnten Proben mit den Abmessungen $L \times B \times H = 155 \text{ mm} \times 17 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ hergestellt werden (siehe Abbildung 61).

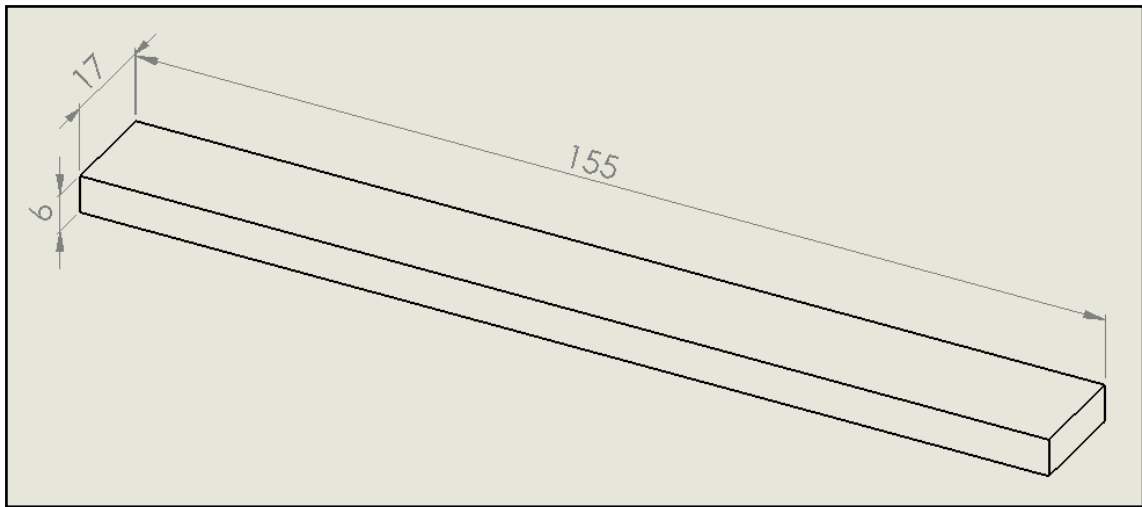


Abbildung 61: Prüfkörper

Nomenklatur der Proben

Um eine korrekte Zuordnung der Proben mit den unterschiedlichen Bearbeitungsparametern zu gewährleisten, wurde folgende Probenbezeichnung eingeführt (siehe Abbildung 62).

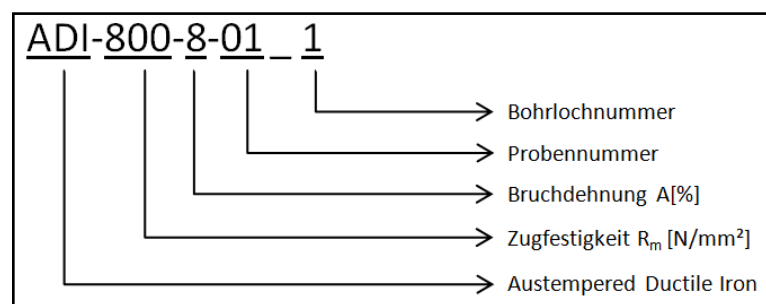


Abbildung 62: Nomenklatur der Proben

4.4 Versuchsanordnung und -durchführung

4.4.1 Versuchsanordnung

Im ersten Arbeitsschritt ist die Werkzeughalterung an den Fräskopf zu montieren. Die Werkzeughalterung wird von unten auf den Fräskopf aufgesteckt und mit Hilfe der Schrauben kraftschlüssig verspannt (siehe Abbildung 63).



Abbildung 63: Montage der Werkzeughalterung

Im nächsten Schritt ist das hydrostatische Festwalzwerkzeug HGx-9 in die Werkzeughalterung einzusetzen und ebenfalls mit den Schrauben zu verspannen. Anschließend ist der Hydraulikschlauch des Hydraulikaggregates HGP6.0 mit dem Festwalzwerkzeug zu verbinden (siehe Abbildung 64).

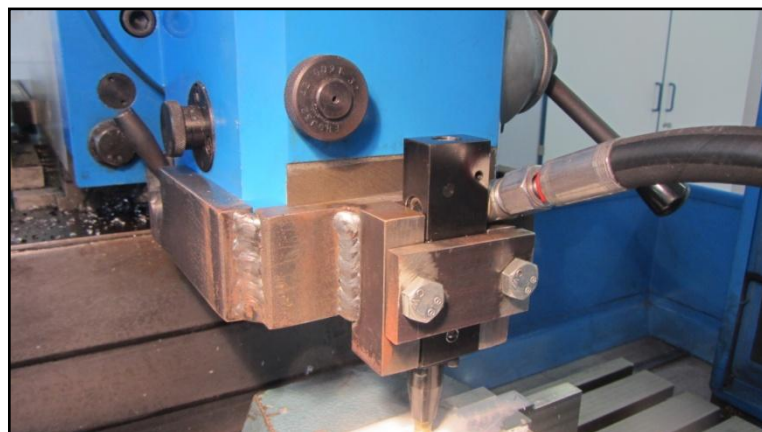


Abbildung 64: Montage des Festwalzwerkzeuges und des Hydraulikschlauches

Gegebenenfalls ist das Kühlschmiermittel im Behälter auf den Anteil an Schmieröl zu prüfen und eventuell zu erneuern. Nach Angaben von ECOROLL werden 8% Öl empfohlen [24]. Abschließend ist das Hydraulikaggregat und die Kühlschmiermittelpumpe mit Netzspannung zu versorgen.

Positionierung des Festwalzwerkzeuges

Nachdem die Probe auf dem Maschinentisch aufgespannt ist, kann die Positionierung des hydrostatischen Festwalzwerkzeuges HGx-9 vorgenommen werden. Durch Verschieben der drei Koordinatenachsen ist das Glattwalzwerkzeug über dem Werkstück am Startpunkt der ersten Spur zu positionieren. Tabelle 4 zeigt die Funktion der Achsen der Fräsmaschine.

Tabelle 4: Steuerung der Achsen

	Funktion
X-Achse	Vorschubweg
Y-Achse	Zustellung der Spurbreite
Z-Achse	Abstand Werkzeug zu Probenoberfläche

Bei der Positionierung der Z-Achse ist das Glattwalzwerkzeug im drucklosen Zustand mit einem Abstand von 1 mm bis 5 mm senkrecht über der Werkstückoberfläche zu platzieren [24]. Durch die hydrostatische Lagerung stellt sich der Walzkopf automatisch zu und hält die Walzkraft konstant.

Steuerung der Walzkraft

Die Einstellung der Festwalzkraft wird über ein Druckbegrenzungsventil mit Manometeranzeige gesteuert. Laut ECOROLL kann eine maximale Festwalzkraft von 1000 N mit dem Festwalzelement HG6 erzielt werden. Tabelle 5 (Seite 67) gibt die verwendeten Kräfte mit den ansprechenden Druckeinstellungen am Manometer wieder.

Tabelle 5: Festwalzkräfte und Druckeinstellungen

Festwalzkraft [N]	Druckeinstellung am Manometer [bar]
250	100
500	200
750	300
1000	400

4.4.2 Versuchsdurchführung Festwalzen

Bei der Durchführung der Festwalzversuche wurde stets mit derselben Vor-
schubgeschwindigkeit $V_f = 100 \text{ mm/min}$ verfahren. Tabelle 6 gibt eine Übersicht
über die festgewalzten Proben.

Tabelle 6: Festwalzprotokoll

Probe	Druck [bar]	Festwalzkraft [N]	Walzspur			
			Länge [mm]	Gesamtbreite [mm]	Anzahl Bahnen	Zustellung Y für nächste Bahn [mm]
10	100	250	125	8,7	41	0,2
14	100	250	120	8,6	41	0,2
22	200	500	120	8,6	41	0,2
24	200	500	120	8,6	41	0,2
8	300	750	130	8,9	41	0,2
11	300	750	120	8,6	41	0,2
9	400	1000	120	8,6	41	0,2
4	400	1000	120	8,6	41	0,2
1	300	750	125	9,3	28	0,3
6	300	750	125	9,1	14	0,6
12	300	750	125	9,3	17	0,5
25	300	750	125	9,1	21	0,4

Der Durchlauf jedes Festwalzvorganges wiederholt sich solange, bis die geforderte Bahnbreite erreicht ist. Vor Beginn des Festwalzens sollte das Walzwerkzeug bereits in Position zum Festwalzen stehen. Nachfolgende Schritte sind nun durchzuführen:

- Kugelhahn der Schmiermittelpumpe öffnen und Schmiermittelpumpe einschalten

- Hydraulikaggregat einschalten und warten bis Arbeitsdruck vollständig erreicht ist
- Festwalzvorgang durch Betätigen des Vorschubes an der Fräsmaschine starten, gewünschte Bahnlänge abfahren und beenden
- Hydraulikaggregat ausschalten und warten bis das Walzelement sich zurückzieht
- Schmiermittelpumpe ausschalten und Kugelhahn schließen

Nun kann das Festwalzwerkzeug zurück zur Startposition gefahren werden. Im letzten Arbeitsgang ist die Zustellung der Spurbreite über die Y-Achse einzustellen. In Abbildung 65 ist der Festwalzvorgang der Probe 01 bei 300 bar Druck bzw. 750 N Festwalzkraft zu sehen.

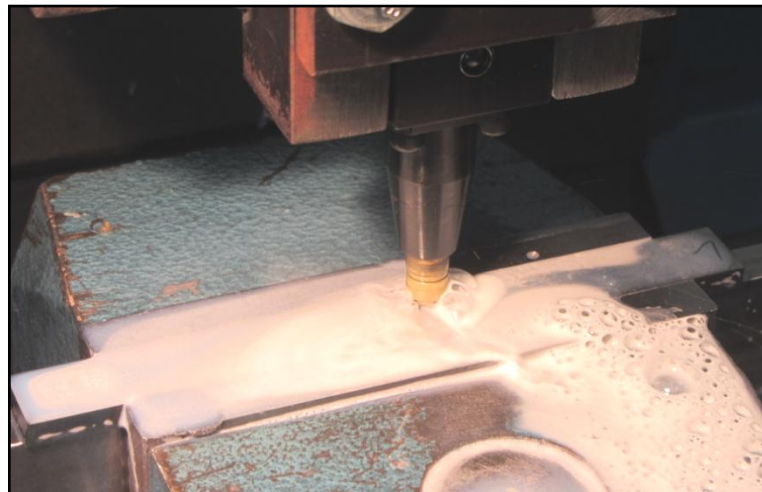


Abbildung 65: Festwalzvorgang der Probe 01 bei 300bar

5 Ermittlung der Eigenspannungstiefenverläufe

5.1 Allgemeines

Nachdem im Kapitel 4 das Festwalzen der Proben durchgeführt wurde, sollen nun die Eigenspannungstiefenverläufe gemessen werden. Um die verschiedenen Messreihen miteinander vergleichen zu können, wurden die von dem Programm H-Drill berechneten Ergebnisse in EXCEL exportiert und grafisch in Form eines Spannungs-Messtiefen-Diagramms dargestellt. In diesen Diagrammen werden die Mittelwerte der Spannungsverläufe über die X- und Y-Richtung für die gemessenen Bohrlöcher abgebildet. Dies bietet den Vorteil einer genauen Richtungszuordnung der Spannungen. Die Spannungsverläufe der maximalen und minimalen Hauptspannungen gleichen im Tiefenverlauf der Spannungsverläufe über die X- und Y-Richtung (vergl. Abbildung 56 und Abbildung 57), jedoch mit leicht veränderten Spannungswerten, je nach Abhängigkeit in welchem Winkel diese zur X-Richtung auftreten. Im Diagrammtitel ist die gemessene Probe sowie das Bohrloch vermerkt (siehe Nomenklatur der Proben, Kapitel 4.3). In den Grafiken sind die berechneten Eigenspannungen in X-Richtung (blaue Punktlinie) und in Y-Richtung (rote Punktlinie) aufgetragen. Weiterhin sind die Regressionskurven (linear oder logarithmisch) in X-Richtung (blaue Linie) und in Y-Richtung (rote Linie) eingetragen.

Bei der Durchführung der Messungen sind je Probe zwei Bohrlöcher gefräst worden. Dies diente dem Zweck eines Vergleiches der Spannungstiefenverläufe. So ist es möglich, aufgrund der Inhomogenität des Gefüges, dass zwei unterschiedliche Spannungstiefenverläufe je Probe gemessen werden. In diesem Fall empfiehlt es sich, eine weitere Messung auf derselben Probe durchzuführen. Um einen möglichst detaillierten Spannungsverlauf an der Oberfläche zu erhalten, wurde beschlossen, bis zu einer Messtiefe von 0,3 mm in 0,02 mm-Schritten Messungen durchzuführen. Ab 0,3 mm Messtiefe wurden alle 0,1 mm Messungen durchgeführt bis zu einer Tiefe von 1 mm. Aufgrund der hohen Fes-

tigkeit des Probenmaterials stellte sich heraus, dass diamantbesetzte Fingerfräser der Fa. KOMET DENTAL sich als die am standhaftesten erwiesen. Allerdings ist es ratsam, nach jedem Bohrloch einen neuen Fräser zu verwenden.

Bei den Auswertungen in den Kapiteln 5.2 bis 5.5 beziehen sich alle Spannungswerte sowie die Messtiefen jeweils auf die Regressionskurven. Es soll noch erwähnt werden, dass aufgrund des hohen Messaufwandes und der geringen Zeit, die zur Verfügung stand, noch nicht genügend Messungen durchgeführt wurden, um diese statistisch sicher belegen zu können.

5.2 Einfluss des Schmirgels der Oberfläche

Zunächst sollte überprüft werden, welchen Einfluss das Schmirgeln der Oberfläche auf die Spannungen hat. Die Probe ADI-800-90 wurde im Ausgangszustand mit gefräster Oberfläche verwendet. Auf dieser Probe wurden zwei Messungen vorgenommen. Bei Messung eins (ADI-800-90_1) fand ein Schmirgeln der Oberfläche statt. Die Messung ADI-800-90_2 wurde ohne diesen Bearbeitungsschritt durchgeführt. In der Abbildung 66 und Abbildung 67 (Seite 71) gibt die Ordinatenachse die berechneten Eigenspannungen in MPa in einem Bereich von -1500 MPa bis +1500 MPa wieder. Auf der Abszissenachse ist die Messtiefe in Zehntelschritten bis 1,0 mm aufgetragen. Da an diesen Proben noch keine Verfestigung der Oberfläche stattfand, wurde eine lineare Regression bis zu einer Messtiefe von 0,65 mm durchgeführt. Beim Vergleichen der berechneten Spannungen miteinander ist ein ähnlicher linearer Spannungsverlauf in X- und Y-Richtung zu erkennen. So sind nahe der Oberfläche Druckeigenspannungen im Größenbereich von rund -400 MPa vorhanden. Mit zunehmender Messtiefe nehmen die Druckspannungen ab, bis diese bei der Messtiefe von 0,3 mm bis 0,4 mm in Zugeigenspannungen umschlagen. In der Messtiefe von 0,4 mm bis zur maximal berechneten Messtiefe von 0,65 mm steigen die Zugeigenspannungen weiter an und erreichen ihr Maximum bei 0,65 mm mit 200 MPa bis 400 MPa. Auf der beigefügten CD sind die berechneten Spannungen als Zahlenwerte zur Ergänzung zu den Diagrammen hinterlegt.

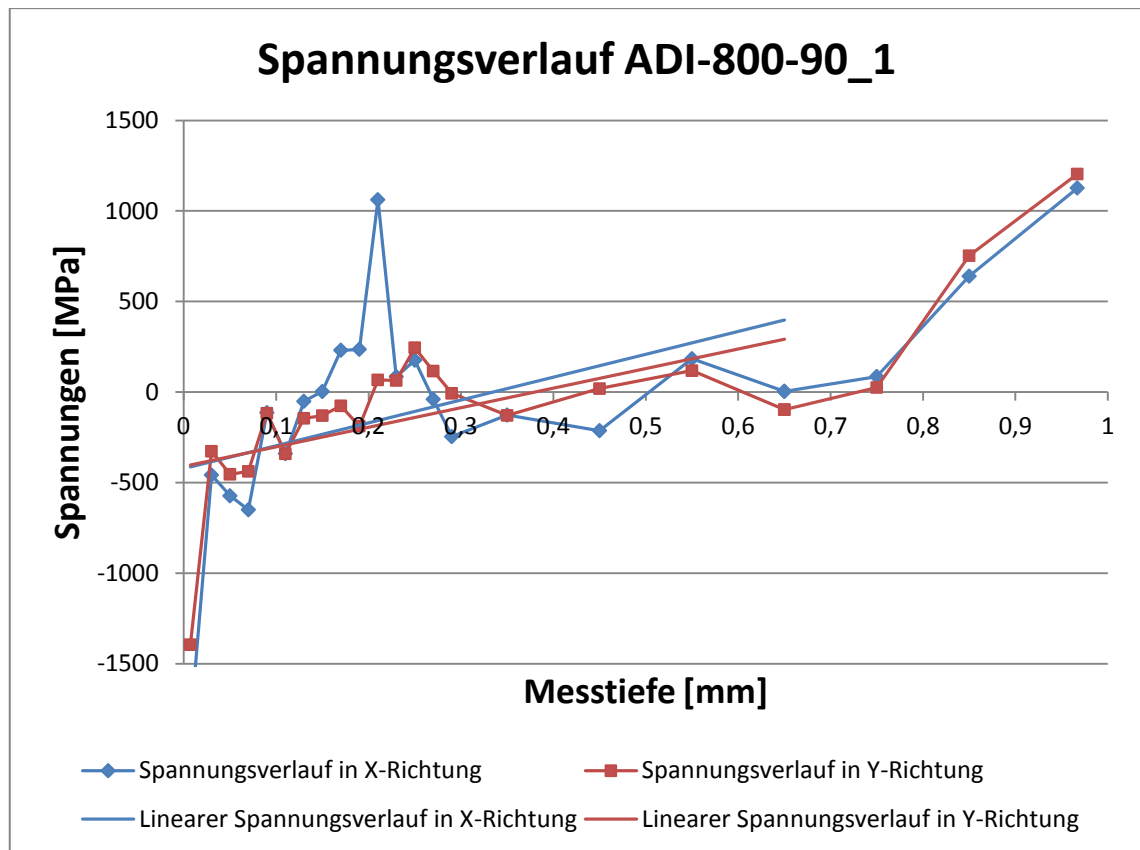


Abbildung 66: Spannungsverlauf ADI-800-90_1 angeschliffen

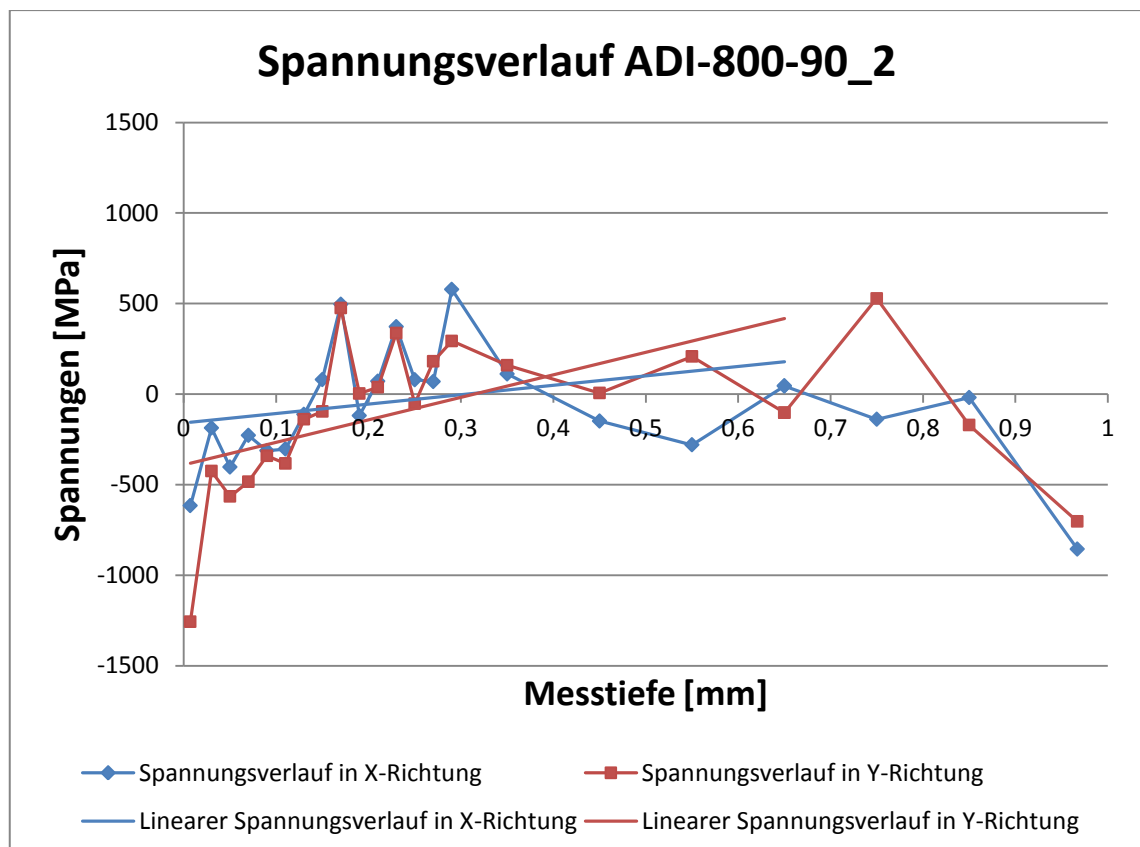


Abbildung 67: Spannungsverlauf ADI-800-90_2 unbehandelt

Anhand der übereinstimmenden Ergebnisse ist zu erkennen, dass das Schmirgeln der Oberfläche keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Da eine sichere Installation der DMS nur mit dem Schritt des Schmirgelns garantiert werden kann, ist dieser bei allen Versuchen anzuwenden.

5.3 Referenzprobe

Ein weiterer Punkt, den es zu untersuchen galt, war, Eigenspannungsmessungen an Proben vorzunehmen, dessen Oberflächen lediglich durch eine mechanische Fräsbearbeitung hergestellt wurden. Diese Ergebnisse sind als Referenzwerte anzusehen und mit den festgewalzten Proben zu vergleichen. Als Referenzproben wurden je zwei Messungen an der Probe ADI-800-23 und ADI-800-27 durchgeführt. In Abbildung 68 bis Abbildung 71 (Seite 73, 74) sind die Spannungsverläufe der vier Messungen dargestellt. Die Ordinatenachse gibt die berechneten Eigenspannungen in MPa in einem Bereich von -1500 MPa bis +1500 MPa wieder. Auf der Abszissenachse ist die Messtiefe in Zehntelschritten bis 1,0 mm aufgetragen. Da an diesen Proben noch keine Verfestigung der Oberfläche stattfand, wurde eine lineare Regression bis zu einer Messtiefe von 0,65 mm durchgeführt.

Vergleicht man die vier Messreihen miteinander, so zeigt sich, dass die Spannungsverläufe sich stark ähneln. Dies ist ein Indikator dafür, dass die Messungen korrekt durchgeführt wurden. Wie in den Abbildungen 68 bis 71 (Seite 73, 74) zu sehen, sind jedoch starke Schwankungen zwischen den einzelnen Messpunkten (blaue und rote Punktlinie) vorhanden, weshalb die Spannungsverläufe mit einer linearen Regressionsgeraden ergänzt wurden. Es ist gut zu erkennen, dass die Proben an der Oberfläche ca. 400 MPa bis 500 MPa Zugeigenspannungen besitzen. Mit steigender Messtiefe fallen die Spannungen ab, bis diese sich bei einer Messtiefe zwischen 0,4 mm und 0,5 mm in Druckeigenspannungen umwandeln. Bei der maximalen Messtiefe von 0,65 mm liegen die Spannungen bei -200 MPa bis -250 MPa. Lediglich bei der Messung ADI-800-27_1 blieben die Spannungen im positiven Bereich.

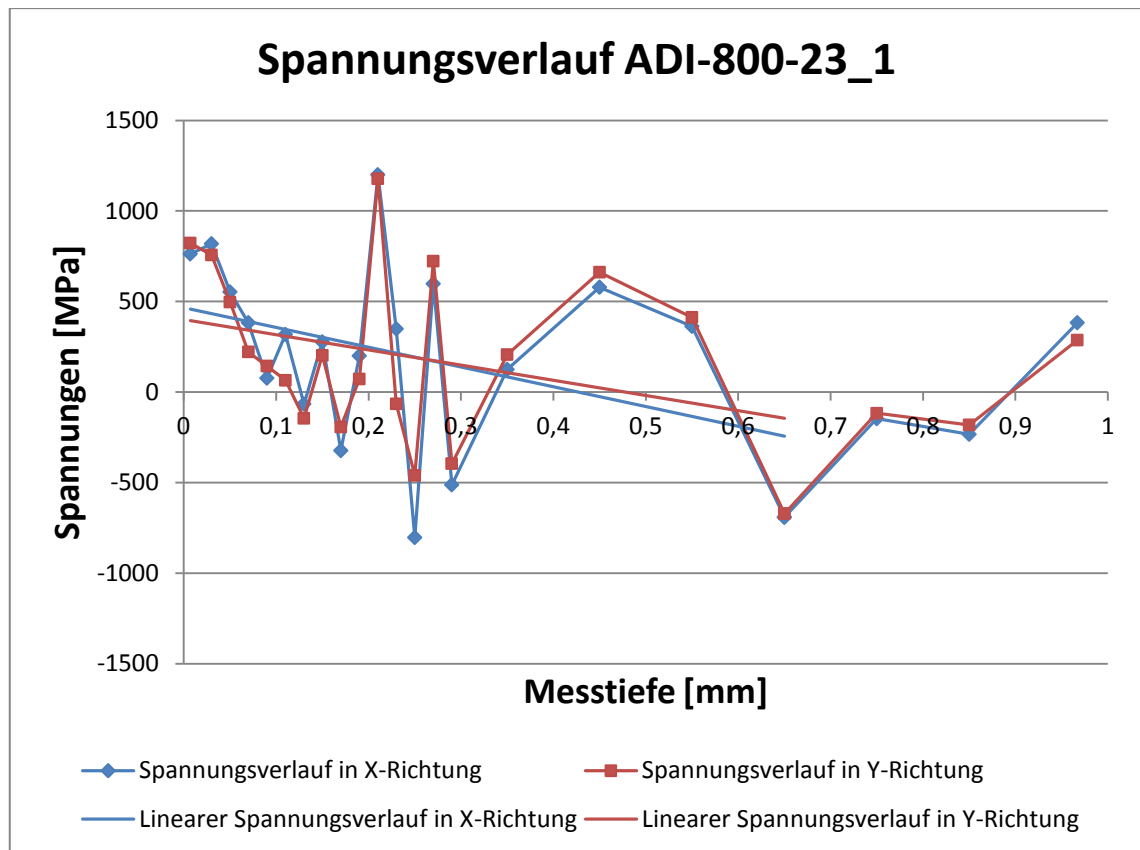


Abbildung 68: Spannungsverlauf ADI-800-23_1

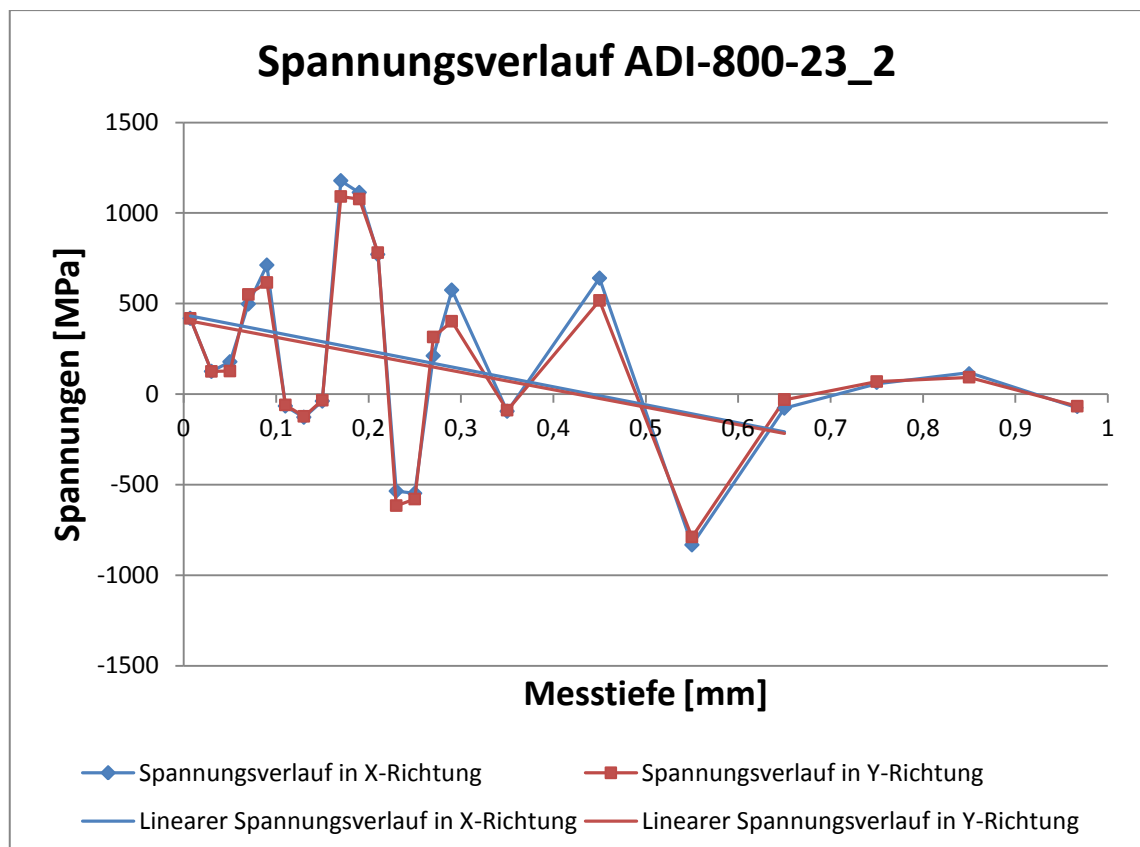


Abbildung 69: Spannungsverlauf ADI-800-23_2

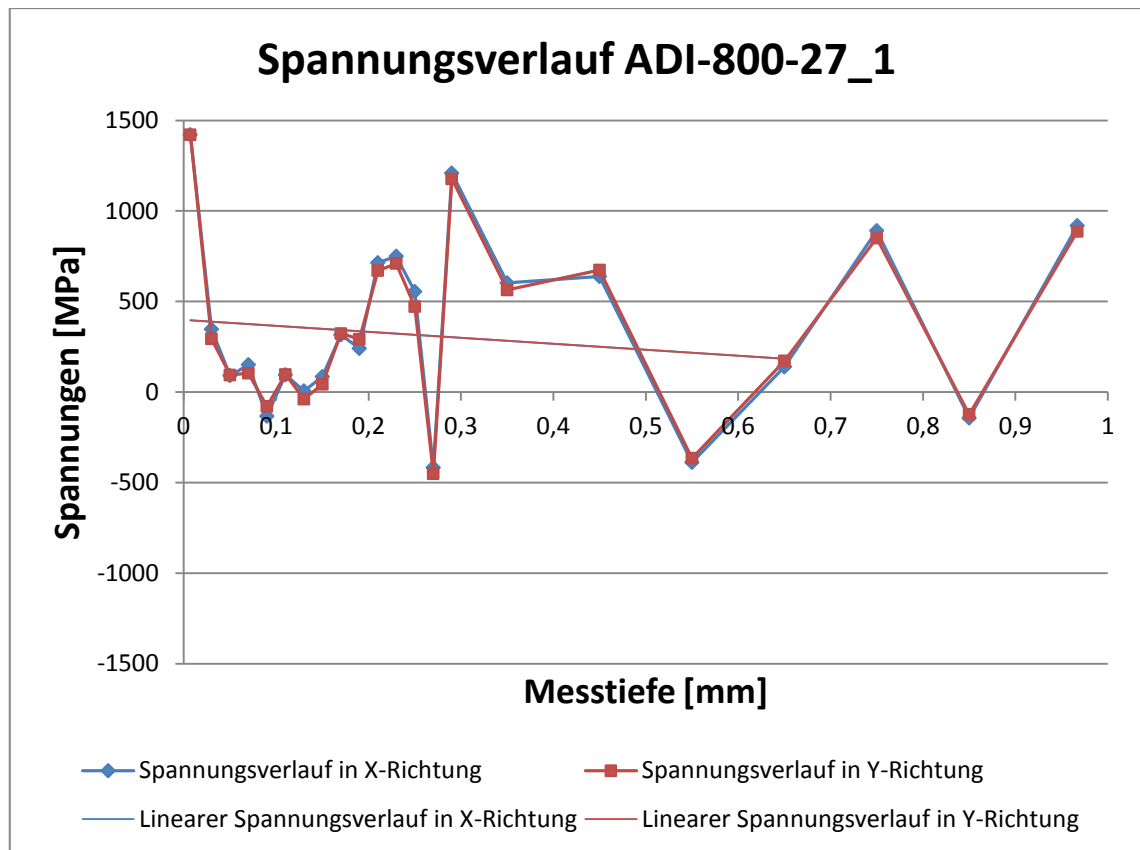


Abbildung 70: Spannungsverlauf ADI-800-27_1

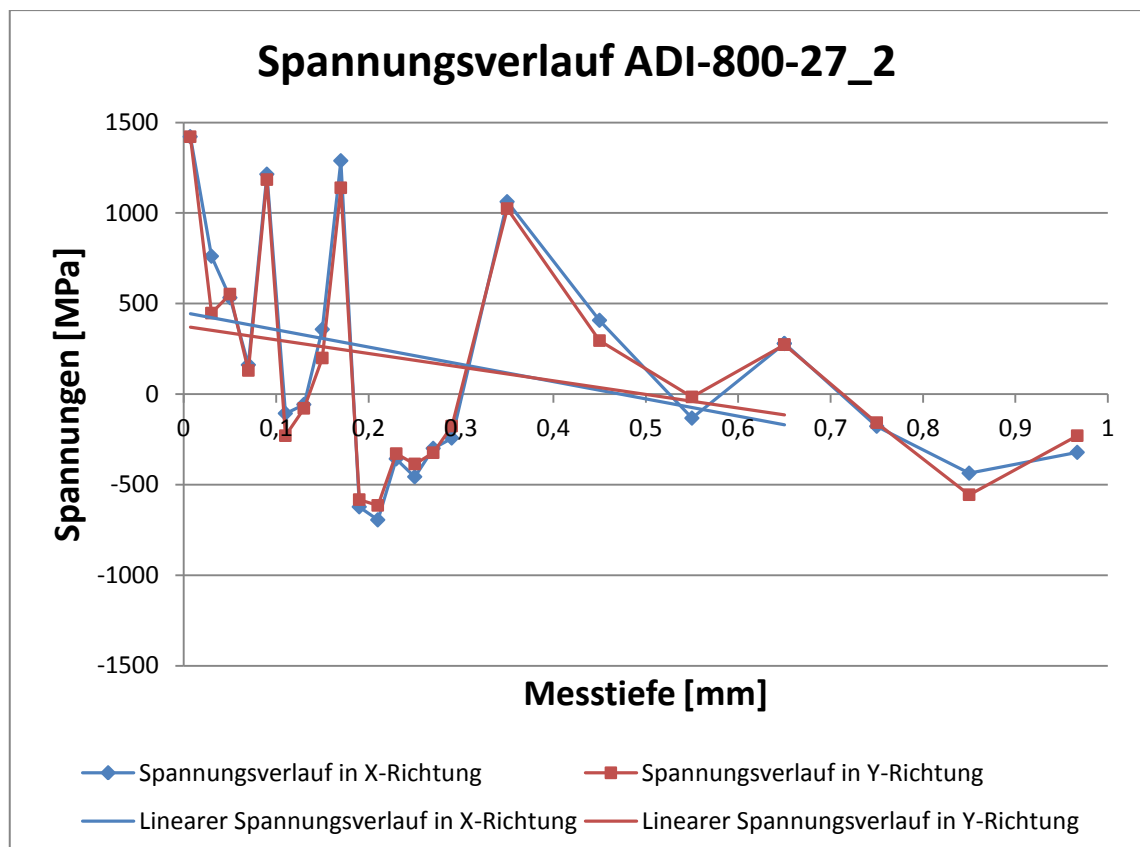


Abbildung 71: Spannungsverlauf ADI-800-27_2

Abschließend sind in Abbildung 72 die Mittelwerte der Spannungsverläufe in X- und Y-Richtung aller Referenzproben dargestellt. Es wurden jeweils die Mittelwerte bei verschiedenen Messtiefen berechnet (siehe Anhang B). Im Durchschnitt lag der berechnete Mittelwert aller Messtiefen in X-Richtung bei 253 MPa und in Y-Richtung bei 234 MPa.

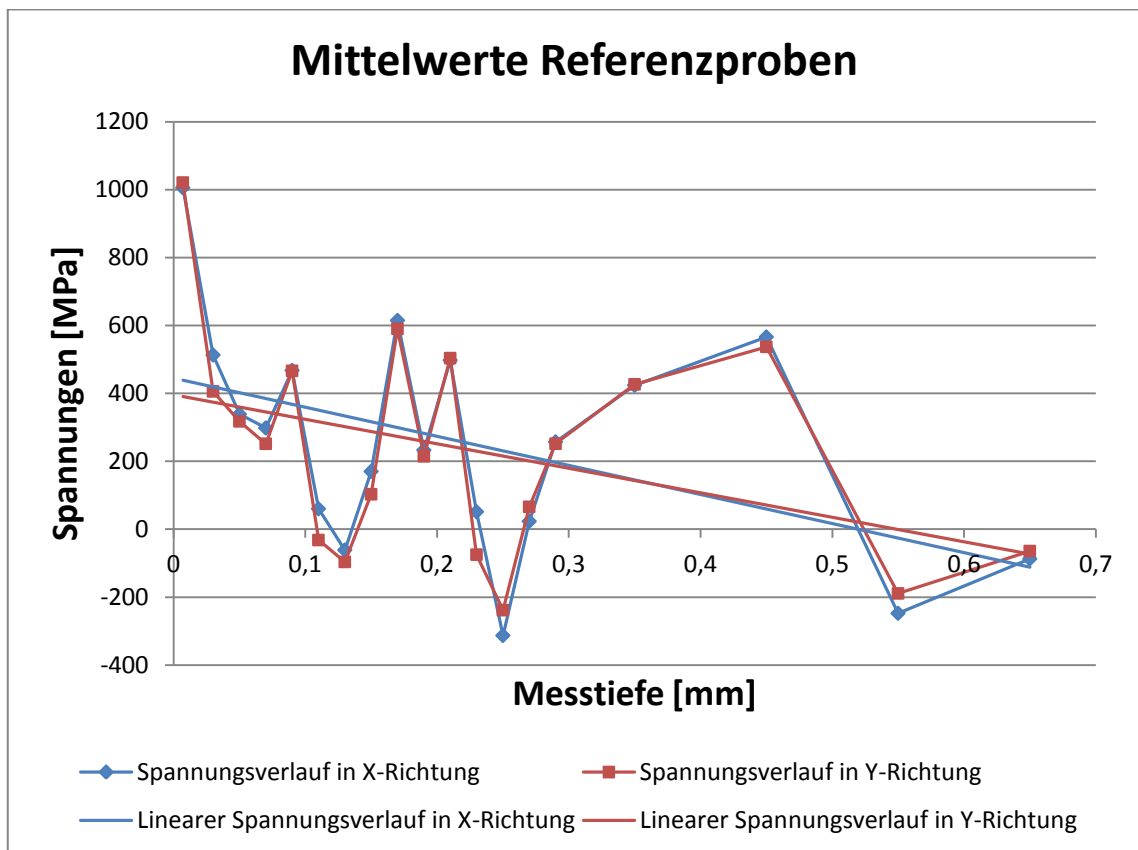


Abbildung 72: Mittelwerte Referenzproben

5.4 Messungen bei verschiedenen Kräften

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse präsentiert werden, welche sich durch die Variation der Festwalzkraft ergeben haben. Zur besseren Übersicht werden nur die Diagramme der Mittelwerte wiedergegeben. Zur Vollständigkeit aller Messwerte soll auf die beigefügte CD verwiesen werden. In Abbildung 73 bis Abbildung 76 (Seite 77 bis 80) sind die mittleren Spannungsverläufe der vier Festwalzkkräfte dargestellt. Die Ordinatennachse gibt die berechneten Eigenspannungen in MPa in einem Bereich von -2000 MPa bis +500 MPa wieder. Auf

der Abszissenachse ist die Messtiefe in Zehntelschritten bis 0,7 mm aufgetragen. Die durch Festwalzen entstandene Rindschichtverfestigung brachte hohe Druckeigenspannungen nahe der Oberfläche in die Proben. Mit zunehmender Messtiefe stellte sich ein linearer Spannungsverlauf ein. Deshalb lag es nahe, die logarithmische Funktion zur Glättung der Messreihen zu verwenden.

5.4.1 Versuche mit Festwalzkraft 250 N

Zunächst soll Tabelle 7 einen Überblick über die Festwalzparameter sowie die gemessenen Proben wiedergeben.

Tabelle 7: Festwalzparameter bei 100 bar

Probe	Druck [bar]	Walzkraft [N]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Spurbreite [mm]
ADI-800-10_1	100	250	100	0,2
ADI-800-10_2	100	250	100	0,2
ADI-800-14_1	100	250	100	0,2
ADI-800-14_2	100	250	100	0,2

Wie in Abbildung 73 (Seite 77) zu erkennen ist, bewirkt ein Festwalzen mit einer Kraft von 250 N bereits eine Verlagerung der Spannungen in den Druckspannungsbereich über die gesamte Messtiefe bis 0,65 mm. Die mit -629 MPa in X-Richtung und -1071 MPa in Y-Richtung direkt an der Oberfläche gemessenen Werte weisen im Vergleich zur Referenzprobe eine erhebliche Festigkeitssteigerung auf. Die mittleren gemessenen Werte (siehe Anhang C) liegen in X-Richtung bei -224 MPa und in Y-Richtung bei -330 MPa. Anzumerken ist, dass bei dieser Festwalzkraft geringe Spannungsschwankungen auftreten.

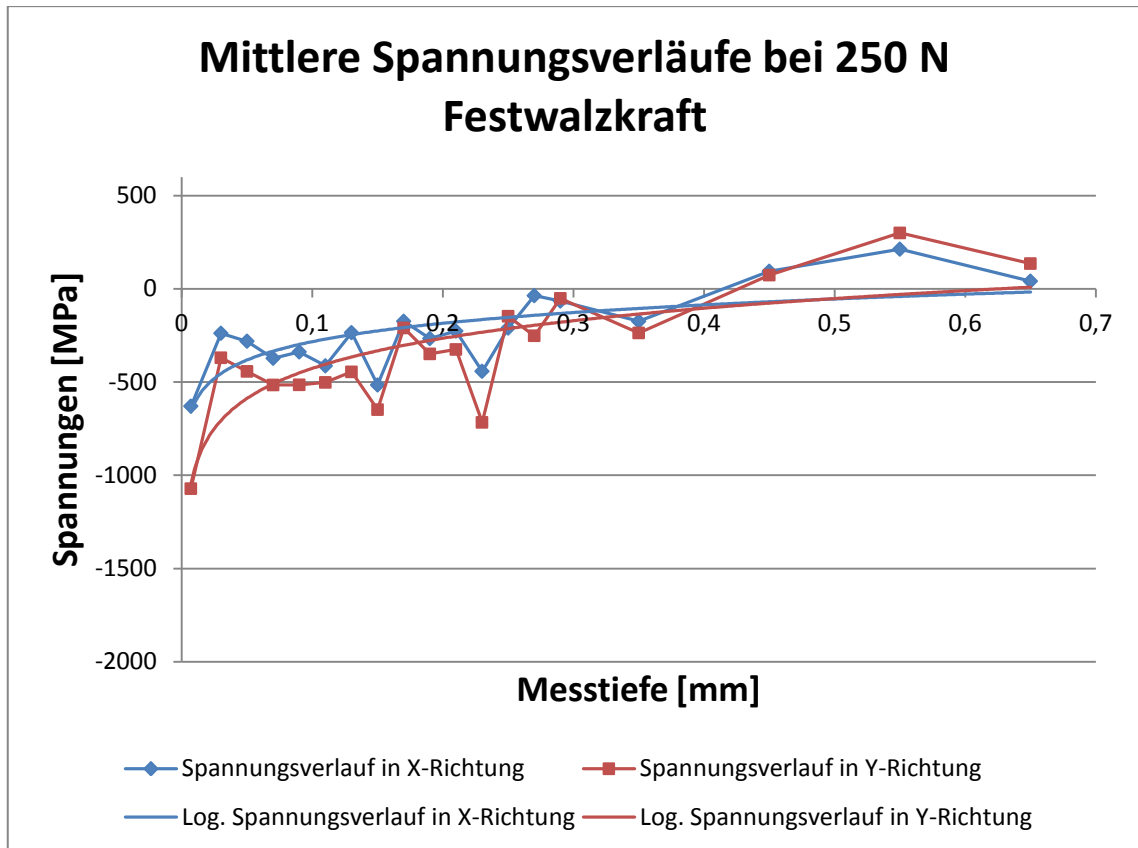


Abbildung 73: Mittlere Spannungsverläufe bei 250 N Festwalzkraft

5.4.2 Versuche mit Festwalzkraft 500 N

Tabelle 8 gibt die Parameter und Proben wieder, die bei einer Festwalzkraft von 500 N verwendet wurden.

Tabelle 8: Festwalzparameter bei 200 bar

Probe	Druck [bar]	Walzkraft [N]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Spurbreite [mm]
ADI-800-22_1	200	500	100	0,2
ADI-800-22_2	200	500	100	0,2
ADI-800-24_1	200	500	100	0,2
ADI-800-24_2	200	500	100	0,2

Eine Festwalzkraft von 500 N erhöht die gemittelten Druckeigenspannungen in X-Richtung auf -339 MPa und in Y-Richtung auf -519 MPa (siehe Anhang D).

Gleichzeitig ist eine Zunahme der Messwertschwankungen (siehe Abbildung 74) zu verzeichnen.

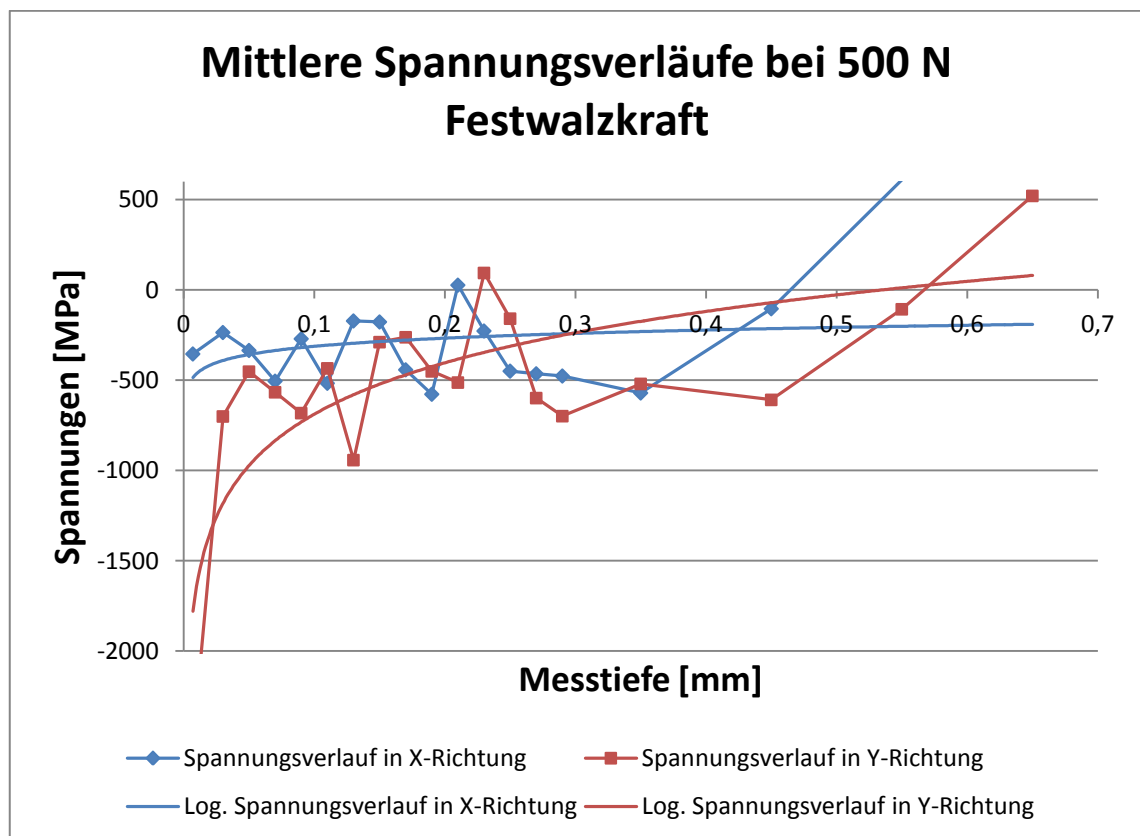


Abbildung 74: Mittlere Spannungsverläufe bei 500 N Festwalzkraft

5.4.3 Versuche mit Festwalzkraft 750 N

Tabelle 9 gibt eine Übersicht zu den Festwalzparametern und Proben.

Tabelle 9: Festwalzparameter bei 300 bar

Probe	Druck [bar]	Walzkraft [N]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Spurbreite [mm]
ADI-800-08_1	300	750	100	0,2
ADI-800-08_2	300	750	100	0,2
ADI-800-11_1	300	750	100	0,2
ADI-800-11_2	300	750	100	0,2

Die Eigenspannungen bei der Festwalzkraft von 750 N verlaufen über die gesamte Messtiefe im Druckspannungsbereich (siehe Abbildung 75) und weisen sowohl in X-Richtung mit -428 MPa als auch in Y-Richtung mit -694 MPa die höchsten Mittelwerte im Druckspannungsbereich auf. Im Anhang E sind die Zahlenwerte aufgeführt.

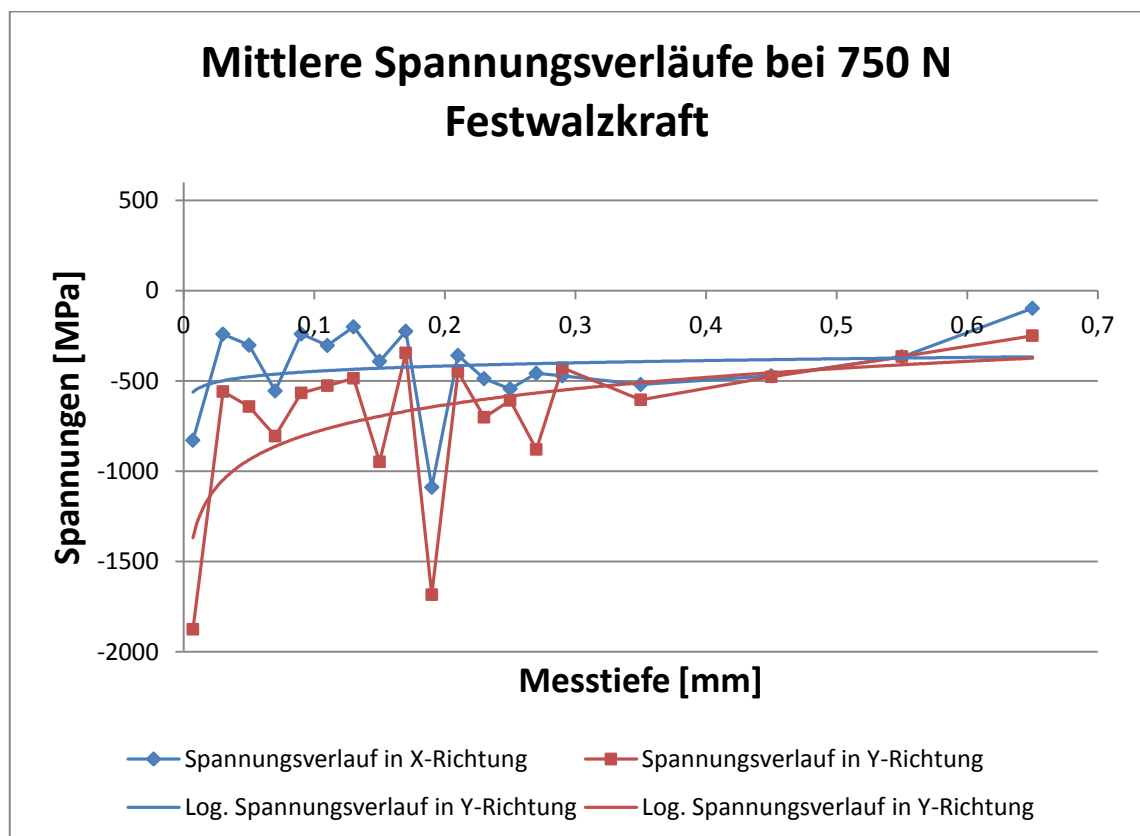


Abbildung 75: Mittlere Spannungsverläufe bei 750 N Festwalzkraft

5.4.4 Versuche mit Festwalzkraft 1000 N

Tabelle 10 gibt eine Übersicht zu den Festwalzparametern und Proben.

Tabelle 10: Festwalzparameter bei 400 bar

Probe	Druck [bar]	Walzkraft [N]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Spurbreite [mm]
ADI-800-04_1	400	1000	100	0,2
ADI-800-04_2	400	1000	100	0,2
ADI-800-09_1	400	1000	100	0,2
ADI-800-09_2	400	1000	100	0,2

Ein ähnlicher Spannungsverlauf, wie bei den Versuchen mit 750 N, zeigte sich bei der Messreihe mit 1000 N Festwalzkraft (siehe Abbildung 76). Die Spannungsmittelwerte lagen etwas unter denen, die mit 750 N festgewalzt wurden. Im Mittel ergab sich für die X-Richtung ein Wert von -391 MPa und für die Y-Richtung ein Wert von -693 MPa.

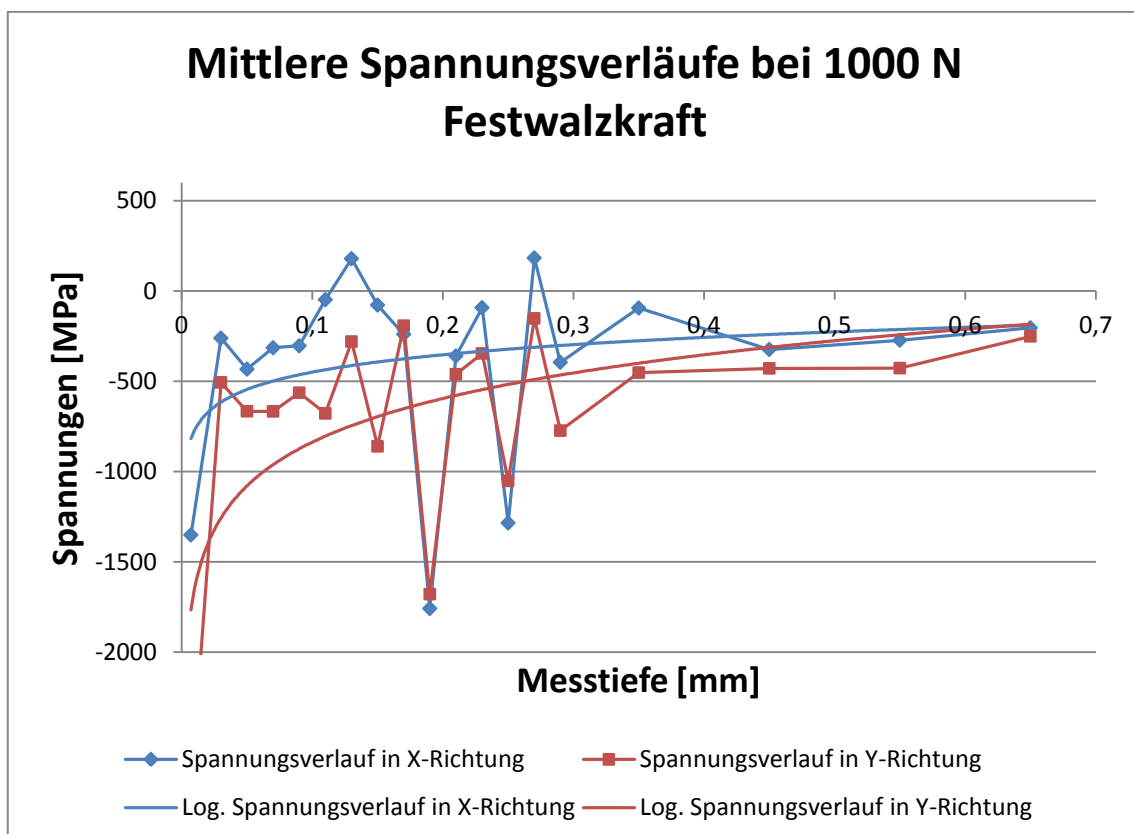


Abbildung 76: Mittlere Spannungsverläufe bei 1000 N Festwalzkraft

Als negative Erscheinung machte sich die zunehmende Schwankung der Spannungsverläufe bemerkbar. Besonders starke Schwankungen traten bei der Messreihe mit 1000 N Festwalzkraft in dem Tiefenbereich bis zu 0,35 mm auf. Im Bereich von 0,35 mm bis 0,65 mm setzte sich ein gleichmäßiger Verlauf fort. Diese Tendenz machte sich bereits bei der 750 N-Reihe bemerkbar. Die Ursache konnte im Rahmen dieser Arbeit noch nicht geklärt werden, bietet aber Potential, Nachfolgeuntersuchungen fortzusetzen. Abschließend soll auf die im Anhang F bereitgestellten Werte zum Vergleich der Spannungen bei 1000 N Festwalzkraft verwiesen werden.

5.4.5 Vergleich der unterschiedlichen Festwalzkkräfte

Zusammengefasst sollen in diesem Kapitel die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.3 und 5.4 veranschaulicht werden. In der Tabelle 11 sind die Mittelwerte in X- und Y-Richtung der Referenzprobe sowie die vier unterschiedlichen Festwalzkkräfte dargestellt.

Tabelle 11: Vergleich der Spannungsmittelwerte

Versuchsreihe	Spannungen [MPa]	
	X-Richtung	Y-Richtung
Referenz	253	234
250 N	-224	-330
500 N	-339	-519
750 N	-428	-694
1000 N	-391	-693

Anhand der Zahlenwerte ist zu entnehmen, dass die Referenzproben erwartungsgemäß Zugeigenspannungen besitzen (schwarze Linie in Abbildung 77, Seite 82). Sobald eine mechanische Bearbeitung durch Festwalzen vorgenommen wird, wandeln sich die Zugspannungen in Druckspannungen um. In Abbildung 77 (Seite 82) ist deutlich zu erkennen, dass bereits bei einer Festwalzkraft von 250 N (rote Linie in Abbildung 77, Seite 82) direkt an der Oberfläche rund -600 MPa Druckspannungen vorherrschen. Mit zunehmender Messtiefe sinken

diese jedoch schnell ab. Selbiges gilt für die 500 N-Versuche (grüne Linie in Abbildung 77) und die 1000 N-Versuche (blaue Linie in Abbildung 77). Jedoch zeigt sich, dass bei dem Spannungsverlauf über die gesamte Messtiefe in X-Richtung höhere Druckeigenspannungen vorhanden sind. Anders verhält es sich bei den 750 N-Versuchen (violette Linie in Abbildung 77). Hier wurde ein konstant hohes Druckeigenspannungsniveau über die gesamte Messtiefe bis 0,65 mm festgestellt. Im Anhang G sind die dazugehörigen Spannungswerte hinterlegt. Zusätzlich zeichnet sich diese Messreihe durch die wesentlich geringeren Schwankungen im Vergleich zu den Messungen mit 1000 N Festwalzkraft aus.

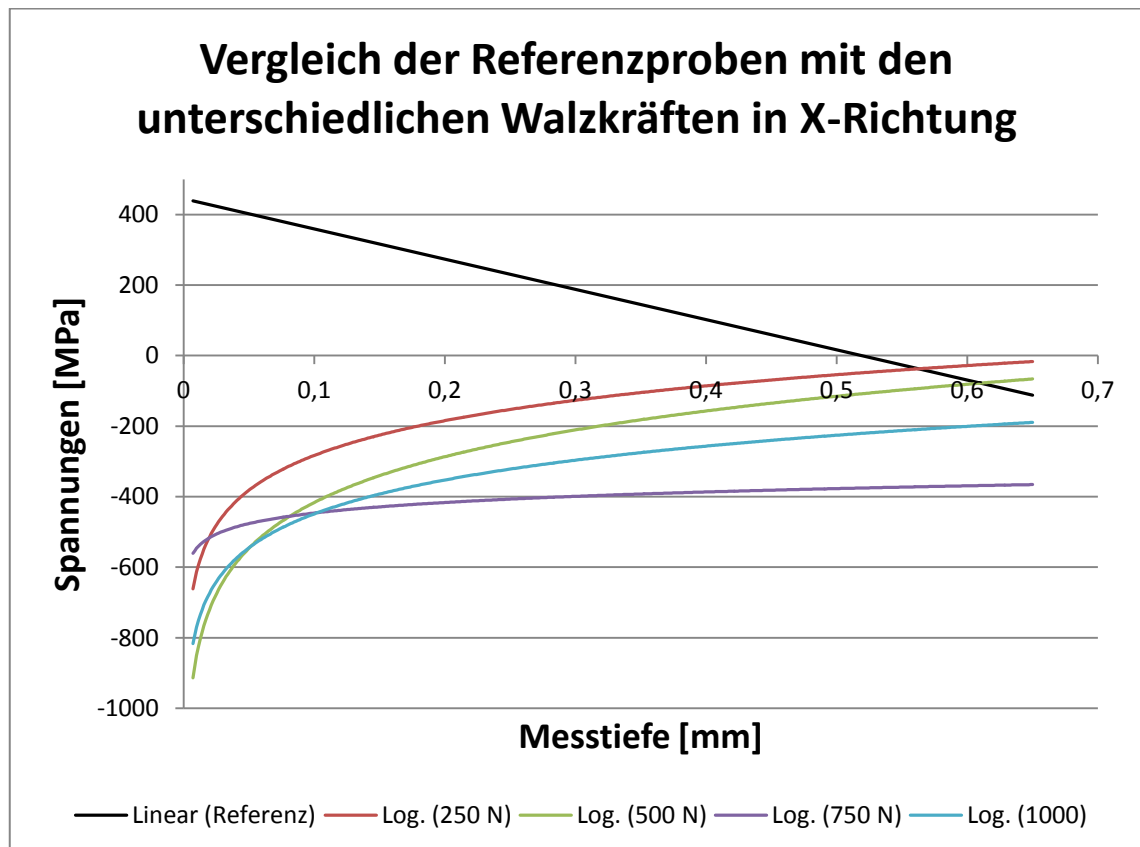


Abbildung 77: Vergleich Referenzproben mit den Walzkräften in X-Richtung

Daher sollte, immer wenn die Anforderung nach konstant hohen Druckeigenspannungen auch in größeren Messtiefen gestellt ist, auf eine Bearbeitung mit 750 N Festwalzkraft zurückgegriffen werden. Richtet sich die Zielstellung auf eine Maximierung der Druckeigenspannung im Randbereich, so ist eine Festwalzkraft von 500 N zu empfehlen.

Einen ähnlichen Spannungsverlauf zeigen die Eigenspannungen in Y-Richtung (siehe Abbildung 78). Allerdings sind die Druckeigenspannungen direkt an der Oberfläche im Vergleich zu der X-Richtung wesentlich höher. Im Anhang H sind die dazugehörigen Spannungswerte hinterlegt.

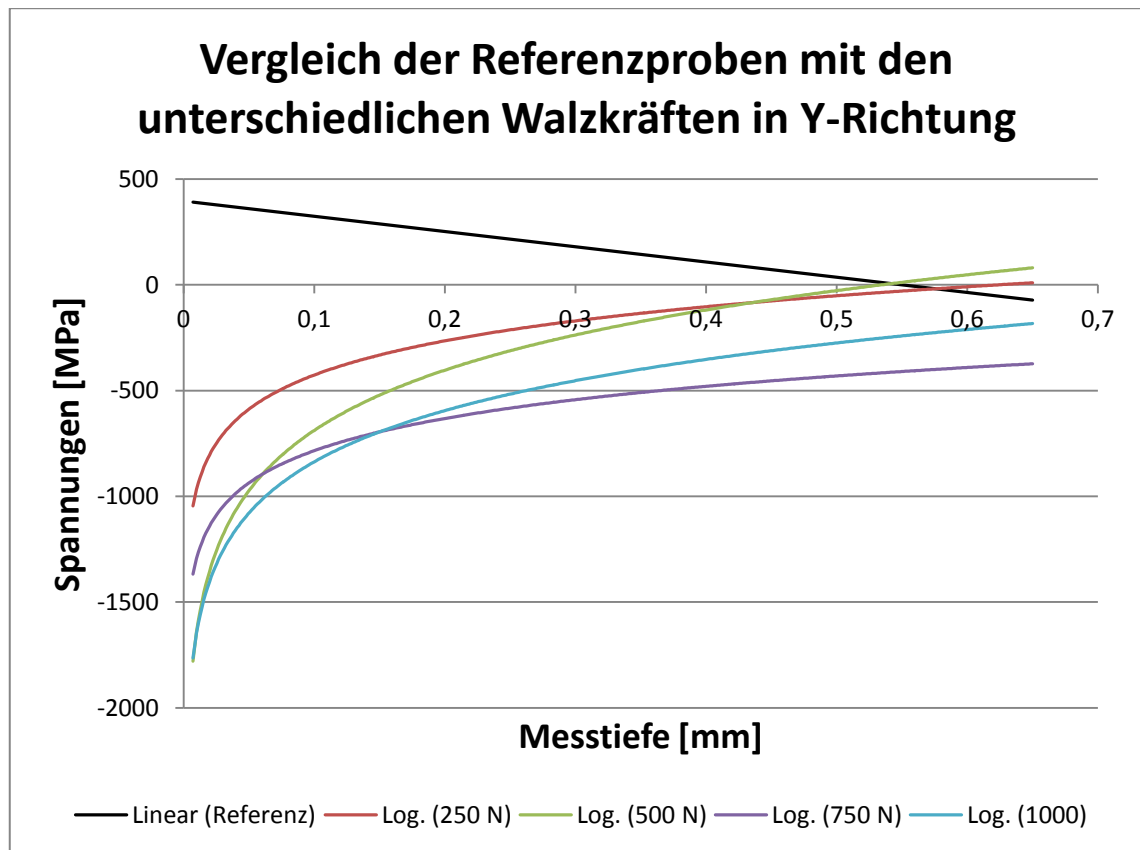


Abbildung 78: Vergleich Referenzproben mit den Walzkräften in Y-Richtung

5.5 Messungen bei verschiedenen Spurbreiten

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Messreihen mit 750 N sich als die am gleichmäßigsten erwiesen haben, wurde entschieden, bei dieser Kraft eine Variation der Spurbreite zu untersuchen. Da keinerlei Erfahrungswerte zur Verfügung standen, wurde sich nach einer Vorgabe der Fa. ECOROLL gerichtet. Diese gab eine maximale Spurbreite von 0,5 mm an [24]. So wurde festgelegt, dass je zwei Messungen bei einer Spurbreite von 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm und 0,6 mm (siehe Tabelle 12, Seite 84) durchgeführt werden sollten.

Tabelle 12: Festwalzparameter der verschiedenen Spurbreiten

Probe	Druck [bar]	Walzkraft [N]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Spurbreite [mm]
ADI-800-01_1	300	750	100	0,3
ADI-800-01_2	300	750	100	0,3
ADI-800-06_1	300	750	100	0,4
ADI-800-06_2	300	750	100	0,4
ADI-800-12_1	300	750	100	0,5
ADI-800-12_2	300	750	100	0,5
ADI-800-25_1	300	750	100	0,6
ADI-800-25_2	300	750	100	0,6

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde folgendermaßen vorgegangen. Je Probe/Spurbreite wurden zwei Messungen durchgeführt. Aus den beiden Eigenspannungswerten in X-Richtung wurde der Mittelwert errechnet. Dies wurde für die Spurbreiten von 0,2 mm bis 0,6 mm in Zehntelschritten vorgenommen und in ein Diagramm (siehe Abbildung 79, Seite 85) übertragen. Ausgehend von der Spurbreite 0,2 mm (schwarze Linie), diese soll als Vergleichswert angenommen werden, ist in dem Diagramm zu erkennen, dass bei der Spurbreite 0,3 mm (rote Linie) die Eigenspannungswerte unter der schwarzen Linie liegen. Mit steigender Spurbreite ist ein Abfall der Druckeigenspannungen zu erkennen. So lassen die Spannungen kontinuierlich nach (grüne Linie 0,4 mm, violette Linie 0,5 mm, blaue Linie 0,6 mm). Allgemein ist festzuhalten, dass eine Veränderung der Spurbreite eine Änderung des Eigenspannungszustandes im Bereich von 0,0 mm bis 0,2 mm bewirkt. Bereits ab 0,25 mm Messtiefe nähern sich die Eigenspannungswerte einem Niveau an, an dem die Festwalzkraft einen höheren Einfluss am Eigenspannungstiefenverlauf hat. Die Mittelwerte der unterschiedlichen Spurbreiten in X-Richtung sind im Anhang I angefügt.

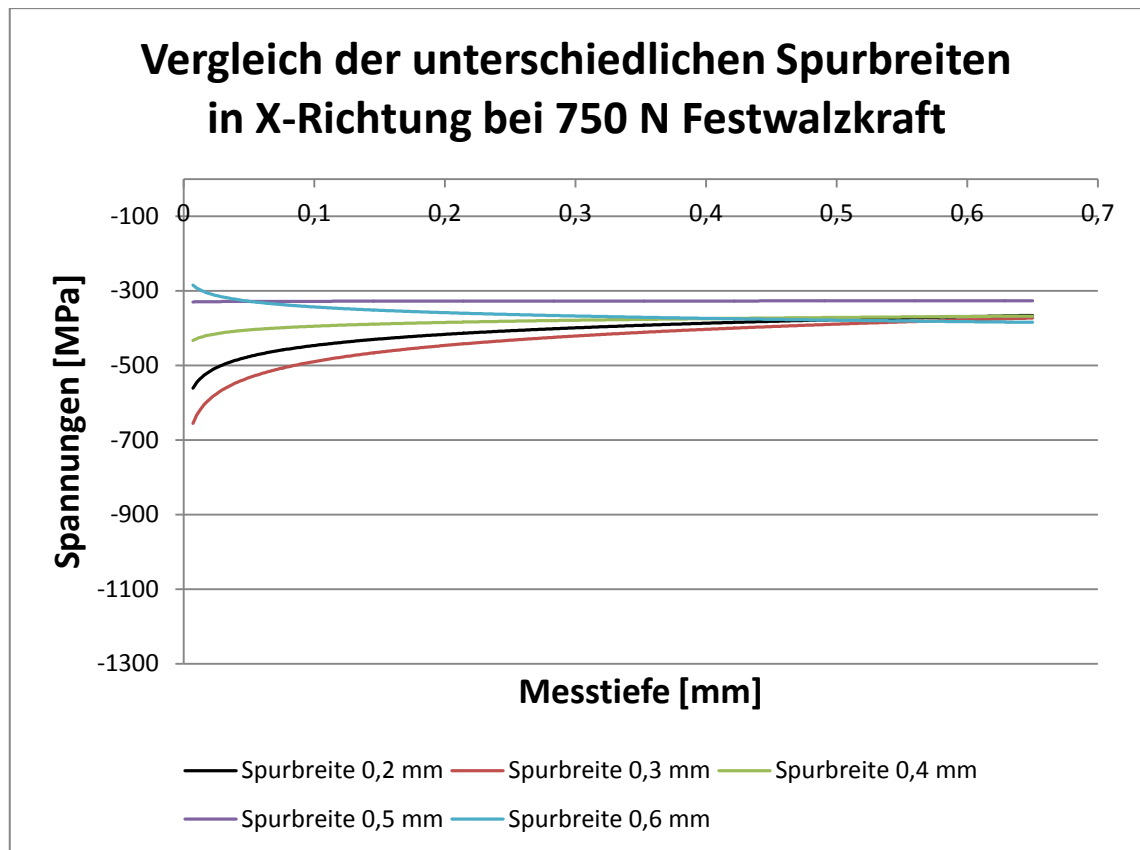


Abbildung 79: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in X-Richtung

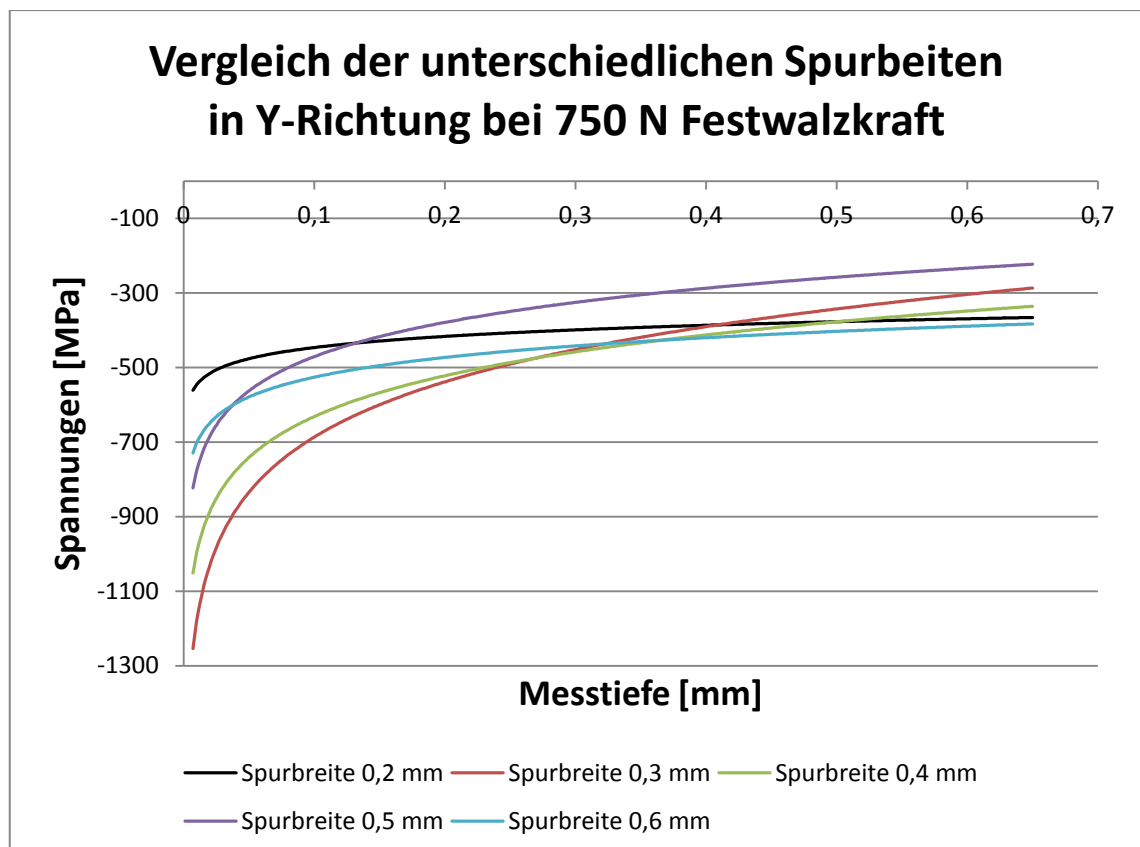


Abbildung 80: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in Y-Richtung

Einen ähnlichen Spannungsverlauf zeigen die Eigenspannungen in Y-Richtung (siehe Abbildung 80, Seite 85). Allerdings sind die Druckeigenspannungen direkt an der Oberfläche, im Vergleich zu der X-Richtung, wesentlich höher. Im Anhang J sind die dazugehörigen Spannungswerte hinterlegt. Abschließend soll auch hier erwähnt werden, dass aufgrund der geringen Anzahl durchgeführter Versuche noch keine statistisch sicheren Aussagen gemacht werden können. Daher empfiehlt es sich, die Ergebnisse mit weiteren Messungen zu sichern.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass es möglich ist, Eigenspannungstiefenverläufe mit dem Bohrlochverfahren gut zu erfassen. Allerdings werden Messungen mit steigender Festigkeit des Werkstoffes und größerer Inhomogenität des Gefüges, wie bei den untersuchten GJS-800-8, anfälliger für Fehler. Dies zeichnet sich durch extreme Spannungsschwankungen größer 100 MPa zwischen zwei Tiefeninkrementen aus. Folglich lassen sich diese Spannungstiefenverläufe nur durch Glättung mittels Regressionsanalyse miteinander vergleichen. Generell lassen sich qualitative Aussagen über den Eigenspannungszustand machen. So lässt sich gut beurteilen, ob Druck- oder Zugspannungen im Bauteil vorliegen. Die quantitativen Messergebnisse sollten skeptisch betrachtet werden und daher nur als ungefährer Richtwert dienen.

Das Festwalzen der Proben stellte nach der Herstellung der Halterung für die konventionelle Fräsmaschine keine Probleme dar. Durch die exakt einzustellenden Bearbeitungsparameter Walzkraft, Spurbreite und Vorschubgeschwindigkeit konnten gut reproduzierbare Festwalzergebnisse erzielt werden. Als nachteilig erwies sich die lange Bearbeitungszeit, besonders bei geringen Spurbreiten. So waren entsprechend viele Walzspuren nötig, bis die benötigte Walzbreite zur Applikation des DMS hergestellt werden konnte. Für weiterführende Untersuchungen ist es vorteilhaft, das Festwalzen an CNC-gesteuerten Maschinen vorzunehmen. Dadurch kann die Bearbeitungszeit erheblich verkürzt werden. Ein weiterer Vorteil einer CNC-Maschine ist die Bearbeitung von mäanderförmigen Mustern und Freiformflächen.

Bei der Ermittlung der Eigenspannungstiefenverläufe sollte zunächst der Einfluss des Anschleifens der Oberfläche auf eventuelle Spannungsinduzierung untersucht werden. Bei dem Vergleich einer angeschliffenen und einer unbehandelten Probe konnten keine merklichen Veränderungen der Spannungen beobachtet werden. Anschließend sind die Eigenspannungstiefenverläufe der Referenzproben ermittelt worden, um Vergleichswerte zu den festgewalzten Proben zu erhalten.

Während die Referenzproben an der Bauteiloberfläche Zugeigenspannungen besaßen, stellte sich heraus, dass bereits ab einer Festwalzkraft von 250 N eine Umwandlung in Druckeigenspannungen erfolgte. Ein zunehmender Anstieg der Druckeigenspannungen konnte bei den Proben mit 500 N und 750 N festgestellt werden. Da beste Ergebnisse hinsichtlich Festigkeitssteigerung und Messstabilität bei 750 N lagen, wurde entschlossen, bei dieser Walzkraft eine Variation der Spurbreite vorzunehmen. Die Erhöhung der Spurbreite in Zehntelschritten von 0,2 mm auf 0,6 mm zeigte jedoch eine Verschlechterung der Messwerte in Form von niedrigeren Druckeigenspannungen direkt unter der Oberfläche. Lediglich die Spurbreite mit 0,3 mm zeigte leicht erhöhte Druckeigenspannungswerte gegenüber der Spurbreite von 0,2 mm auf.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass weitere Eigenspannungsmessungen am GJS-800-8 und der verwendeten Probengeometrie bei einer Festwalzkraft von 750 N mit Variation der Spurbreite bis maximal 0,3 mm pro Spur am erfolgversprechendsten sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Birkel, Ulrich: Ein neues Verfahren zur Ermittlung des Eigenspannungszustandes am Beispiel der Scheibe mit Kreisloch mit Hilfe der Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometrie und der Finite-Elemente-Methode - 2001 - 102 S., Stuttgart, Universität Stuttgart, Fakultät Energietechnik, Dissertation, 2001, S.12 bis 19
- [2] Universität Bayreuth: URL: www.metalle.uni-bayreuth.de/Prakt_H4aEigenspannungsmessung.de, Skript: Word, verfügbar am 12.09.2013
- [3] Bargel. H.-J.; & Schulze. G.: Werkstoffkunde: 2005, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, S. 93, 94, 116, 138, 139
- [4] Radaj, Dieter; Vormwald, Michael: Ermüdungsfestigkeit: 2005, 699 S., Berlin Heidelberg, Springer Verlag, S.116, 117
- [5] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 21. Auflage: 2005, S.E2, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, S.E2 - E4, E33 - E37
- [6] Hahn, Frank: Skript: Begleitmaterial zur Vorlesung "Werkstofftechnik": 2007: Mittweida, Mittweida, S. 55, Seminar Eigenspannungen S. 1 - 6
- [7] Weißbach, Wolfgang: Werkstoffkunde Strukturen, Eigenschaften, Prüfung 16., überarbeitete Auflage: 2007, S.143, Wiesbaden, Viewegs Fachbücher der Technik
- [8] Schindler, H.J.: Mechanische Werkstoffprüfung - klassische Verfahren und neue Entwicklungen, Skript Vorlesung Abt. 3D/SS02, 2002
- [9] Micro Measurements: Die Messung von Eigenspannungen mit dem DMS-Bohrlochverfahren, Tech Note TN-503-6, 2010,

- URL: www.micro-measurements.com
- [10] Timmer, Alexander: Zerstörungsfreier Eigenspannungsnachweis an Triebwerkskomponenten, ZfP-Zeitung 123, Februar 2010
URL: www.ndt.net/article/dgzfp/pdf/zfp123-Timmer.pdf
- [11] Jost, Norbert; Klink, Roman: Band 144 der Publikationsserie "Focus Werkstoffe", Pforzheim, 2012, URL: [www.hs-pforzheim.de/Dede/Hochschule/Pforzheimer Beiträge/Dokumente/Nr144.pdf](http://www.hs-pforzheim.de/Dede/Hochschule/Pforzheimer%20Beitr%C44ge/Dokumente/Nr144.pdf)
- [12] Vishay Precision Group: Katalog Präzisions-DMS, Micro Measurements: Heilbronn
- [13] Großmann, Albert: Erstellung eines Auswertetools für FIB-DAC-Methode zur Bestimmung von Eigenspannungen in dünnen Schichten:
Masterarbeit: HTWK Leipzig, IWM Halle: September 2006: Leipzig
- [14] Micro Measurements: Oberflächenvorbereitung zur DMS-Klebung, Instruktions Bulletin B-129-8, 2010,
URL: www.micro-measurements.com
- [15] Micro Measurements: Auswahl von DMS - Kriterien, Verfahren, Empfehlungen, Tech Note TN-505-4, 2010,
URL: www.micro-measurements.com
- [16] Micro Measurements: DMS-Rosetten - Auswahl, Anwendung und Datenauswertung, Tech Note TN-515, 2010,
URL: www.micro-measurements.com
- [17] Blumenauer, Horst: Werkstoffprüfung, Berlin, 1984
- [18] Micro Measurements: DMS-Installation mit dem Schnellklebstoff M-Bond 200, Instruktions Bulletin B-127, März 2010,
URL: www.micro-measurements.com

- [19] Vishay Precision Group (2013), Model RS-200 Milling Guide Instruction Manual Version 2.0
- [20] Vishay Precision Group (2013), Modell P3 Dehnungsmessbrücke und Datenspeicher, Betriebsanleitung, Heilbronn
- [21] Vishay Precision Group (www.vishaypg.com. abgerufen 12/2013)
URL: www.vishaypg.com/micro-measurements
- [22] Micro Measurements: Die 3-Leiter-Schaltung für DMS-Viertelbrücken, Tech Note TN-612, 2010, URL: www.micro-measurements.com
- [23] Ecoroll: Informationsheft "Anwendungsbeschreibung Festwalzen"
- [24] Ecoroll: Betriebsanleitung "Hydrostatisches Glattwalzwerkzeug HGx-6/HGx-19", Celle, 2011
- [25] Ecoroll: (www.Ecoroll.de abgerufen 01/2014)
URL: www.Ecoroll.de
- [26] Ecoroll: Betriebsanleitung "Hydraulikaggregat HGP6.0", Celle, 2011
- [27] Ecoroll: Informationsheft "Festwalzen im Einstich- und Vorschubverfahren"

Anhangsverzeichnis

- Anhang A: Tabelle zum Notieren der Dehnungen
- Anhang B: Tabelle Mittelwerte Referenzprobe
- Anhang C: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 250 N
- Anhang D: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 500 N
- Anhang E: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 750 N
- Anhang F: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 1000 N
- Anhang G: Vergleich der Referenzproben mit den unterschiedlichen
Walzkräften in X-Richtung
- Anhang H: Vergleich der Referenzproben mit den unterschiedlichen
Walzkräften in Y-Richtung
- Anhang I: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in X-Richtung
- Anhang J: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in Y-Richtung

Anhang

Anhang A: Tabelle zum Notieren der Dehnungen

Probe:		Datum:		Uhrzeit:	
Messtiefe[mm]	$\varepsilon 1 [\mu\varepsilon]$	$\varepsilon 2 [\mu\varepsilon]$	$\varepsilon 3 [\mu\varepsilon]$		
0,0	0	0	0		
0,02					
0,04					
0,06					
0,08					
0,1					
0,12					
0,14					
0,16					
0,18					
0,2					
0,22					
0,24					
0,26					
0,28					
0,3					
0,4					
0,5					
0,6					
0,7					
0,8					
0,9					
1					

Anhang B: Tabelle Mittelwerte Referenzprobe

	X-Spannungen				Mittelwerte X-Spannung je Messtiefe
Mess-tiefe	ADI-800-23_1	ADI-800-23_2	ADI-800-27_1	ADI-800-27_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	763	418	1421	1421	1005,75
0,03	819	125	347	761	513
0,05	553	178	91	532	338,5
0,07	383	497	151	161	298
0,09	77	712	-133	1214	467,5
0,11	318	-66	95	-107	60
0,13	-66	-128	6	-58	-61,5
0,15	277	-39	85	357	170
0,17	-323	1178	316	1288	614,75
0,19	200	1113	241	-623	232,75
0,21	1200	771	714	-695	497,5
0,23	349	-536	750	-358	51,25
0,25	-803	-548	555	-457	-313,25
0,27	598	211	-417	-300	23
0,29	-512	574	1209	-243	257
0,35	125	-95	603	1062	423,75
0,45	579	640	638	407	566
0,55	363	-833	-388	-133	-247,75
0,65	-691	-78	140	279	-87,5
				Spaltenmittelwert [MPa]	253,09

	Y-Spannungen				Mittelwerte Y-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 23_1	ADI-800- 23_2	ADI-800- 27_1	ADI-800-27_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	823	418	1421	1421	1020,75
0,03	757	125	294	447	405,75
0,05	497	127	94	552	317,5
0,07	222	550	104	130	251,5
0,09	144	616	-79	1184	466,25
0,11	65	-60	97	-230	-32
0,13	-145	-123	-39	-79	-96,5
0,15	203	-34	43	199	102,75
0,17	-193	1091	323	1139	590
0,19	72	1077	292	-583	214,5
0,21	1178	781	671	-615	503,75
0,23	-65	-616	710	-329	-75
0,25	-460	-580	472	-386	-238,5
0,27	723	315	-451	-324	65,75
0,29	-395	402	1177	-177	251,75
0,35	207	-89	564	1024	426,5
0,45	662	517	674	295	537
0,55	413	-789	-365	-16	-189,25
0,65	-671	-31	171	273	-64,5
				Spaltenmittel- wert [MPa]	234,63

Anhang C: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 250 N

	X-Spannungen				Mittelwerte X-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 10_1	ADI-800- 10_2	ADI-800- 14_1	ADI-800-14_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-691	-623	-830	-373	-629,25
0,03	-123	-273	-221	-335	-238
0,05	-178	-231	-356	-358	-280,75
0,07	-372	-444	-462	-211	-372,25
0,09	-361	-279	-360	-353	-338,25
0,11	-628	-209	-96	-718	-412,75
0,13	-304	-324	-351	40	-234,75
0,15	-259	-112	-644	-1047	-515,5
0,17	-377	-332	-296	310	-173,75
0,19	-122	-67	-389	-488	-266,5
0,21	129	-506	-188	-341	-226,5
0,23	-432	-482	-478	-376	-442
0,25	-179	25	-584	-103	-210,25
0,27	39	-41	-31	-112	-36,25
0,29	24	-80	44	-249	-65,25
0,35	-179	-105	-122	-289	-173,75
0,45	172	129	-215	293	94,75
0,55	285	85	403	79	213
0,65	-67	-456	-57	745	41,25
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-224,57

	Y-Spannungen				Mittelwerte Y-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 10_1	ADI-800- 10_2	ADI-800- 14_1	ADI-800-14_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-1118	-969	-1427	-773	-1071,75
0,03	-277	-393	-390	-418	-369,5
0,05	-318	-294	-511	-648	-442,75
0,07	-544	-592	-555	-371	-515,5
0,09	-603	-460	-495	-501	-514,75
0,11	-771	-205	-175	-856	-501,75
0,13	-357	-534	-799	-91	-445,25
0,15	-431	-99	-650	-1411	-647,75
0,17	-343	-406	-486	396	-209,75
0,19	-133	-179	-436	-647	-348,75
0,21	-79	-532	-101	-588	-325
0,23	-553	-713	-847	-752	-716,25
0,25	-141	90	-401	-135	-146,75
0,27	-242	-351	-265	-148	-251,5
0,29	-50	-48	88	-194	-51
0,35	-220	-185	-172	-369	-236,5
0,45	66	127	-166	269	74
0,55	395	116	464	225	300
0,65	75	-333	-33	834	135,75
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-330,78

Anhang D: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 500 N

	X-Spannungen				Mittelwerte X-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 22_1	ADI-800- 22_2	ADI-800- 24_1	ADI-800-24_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-1335	-1138	-1093	-1290	-1214
0,03	3	-175	-296	-949	-354,25
0,05	-466	-410	-416	350	-235,5
0,07	84	-271	-398	-754	-334,75
0,09	-446	-407	-170	-996	-504,75
0,11	-106	-460	-497	-19	-270,5
0,13	-411	-66	-723	-866	-516,5
0,15	-157	38	-738	172	-171,25
0,17	-168	-121	-12	-407	-177
0,19	-415	-564	-193	-596	-442
0,21	-1153	-692	-398	-66	-577,25
0,23	-187	1056	-388	-373	27
0,25	-266	-262	129	-509	-227
0,27	-910	-345	-275	-267	-449,25
0,29	-211	-239	-1275	-131	-464
0,35	-638	-562	-188	-517	-476,25
0,45	-443	-704	-898	-236	-570,25
0,55	-338	62	17	-156	-103,75
0,65	-87	529	157	1844	610,75
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-339,50

	Y-Spannungen				Mittelwerte Y-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 22_1	ADI-800- 22_2	ADI-800- 24_1	ADI-800-24_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-2259	-2122	-2520	-3116	-2504,25
0,03	-92	-309	-750	-1650	-700,25
0,05	-808	-630	-776	405	-452,25
0,07	-82	-380	-522	-1281	-566,25
0,09	-552	-556	-440	-1179	-681,75
0,11	-444	-645	-552	-95	-434
0,13	-773	-196	-1660	-1139	-942
0,15	-222	45	-1323	345	-288,75
0,17	-279	-378	149	-539	-261,75
0,19	-389	-681	-335	-397	-450,5
0,21	-1223	-635	-212	20	-512,5
0,23	-169	1489	-456	-487	94,25
0,25	-32	-455	196	-344	-158,75
0,27	-1275	-360	-173	-586	-598,5
0,29	67	-387	-2222	-252	-698,5
0,35	-598	-755	-177	-550	-520
0,45	-378	-626	-1189	-241	-608,5
0,55	-264	119	-170	-112	-106,75
0,65	72	707	94	1211	521
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-519,47

Anhang E: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 750 N

	X-Spannungen				Mittelwerte X-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 08_1	ADI-800- 08_2	ADI-800- 11_1	ADI-800-11_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-818	-366	-922	-1207	-828,25
0,03	-329	-47	-302	-284	-240,5
0,05	-359	39	-328	-559	-301,75
0,07	-421	-1019	-322	-458	-555
0,09	-189	234	-480	-524	-239,75
0,11	-491	-496	0	-226	-303,25
0,13	-104	-30	-327	-339	-200
0,15	-395	-72	-267	-830	-391
0,17	-354	33	-637	59	-224,75
0,19	-285	-2466	-381	-1223	-1088,75
0,21	-582	-366	-553	67	-358,5
0,23	-646	-622	-502	-179	-487,25
0,25	-523	-312	-490	-849	-543,5
0,27	-577	-106	-455	-692	-457,5
0,29	-452	-554	-549	-331	-471,5
0,35	-538	-477	-576	-487	-519,5
0,45	-347	-610	-550	-378	-471,25
0,55	-329	-455	-271	-408	-365,75
0,65	-188	37	279	-518	-97,5
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-428,70

	Y-Spannungen				Mittelwerte Y-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 08_1	ADI-800- 08_2	ADI-800- 11_1	ADI-800-11_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-2003	-935	-2110	-2451	-1874,75
0,03	-751	-328	-604	-550	-558,25
0,05	-743	-172	-558	-1093	-641,5
0,07	-644	-1428	-624	-524	-805
0,09	-398	26	-935	-957	-566
0,11	-893	-690	-295	-224	-525,5
0,13	-360	-497	-563	-519	-484,75
0,15	-997	-429	-575	-1789	-947,5
0,17	-647	49	-889	110	-344,25
0,19	-801	-3905	-542	-1484	-1683
0,21	-841	-476	-671	199	-447,25
0,23	-978	-773	-947	-105	-700,75
0,25	-924	-346	-715	-446	-607,75
0,27	-969	-305	-596	-1645	-878,75
0,29	-679	-674	-363	6	-427,5
0,35	-636	-575	-658	-546	-603,75
0,45	-377	-629	-510	-390	-476,5
0,55	-285	-457	-290	-426	-364,5
0,65	-394	-101	19	-519	-248,75
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-694,00

Anhang F: Tabelle Mittelwerte Festwalzkraft 1000 N

	X-Spannungen				Mittelwerte X-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 04_1	ADI-800- 04_2	ADI-800- 09_1	ADI-800-09_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-1033	-1363	-1614	-1392	-1350,5
0,03	-286	-108	-2	-646	-260,5
0,05	-306	-407	-577	-440	-432,5
0,07	-656	-472	520	-648	-314
0,09	-135	-376	-263	-438	-303
0,11	-395	-255	181	278	-47,75
0,13	121	-683	750	529	179,25
0,15	-1100	-437	69	1158	-77,5
0,17	-310	-302	366	-714	-240
0,19	-766	-679	-5551	-36	-1758
0,21	193	-159	432	-1904	-359,5
0,23	-550	-414	681	-85	-92
0,25	-521	-336	-3364	-916	-1284,25
0,27	-109	-413	620	635	183,25
0,29	-671	-994	312	-226	-394,75
0,35	-712	-468	816	-11	-93,75
0,45	-742	-511	-62	21	-323,5
0,55	-510	-528	161	-211	-272
0,65	-294	-568	95	-47	-203,5
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-391,82

	Y-Spannungen				Mittelwerte Y-Spannung je Mess- tiefe
Mess- tiefe	ADI-800- 04_1	ADI-800- 04_2	ADI-800- 09_1	ADI-800-09_2	
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	-3313	-3318	-1424	-2928	-2745,75
0,03	-709	-291	-289	-734	-505,75
0,05	-593	-831	-438	-800	-665,5
0,07	-1170	-962	87	-620	-666,25
0,09	-323	-637	-700	-592	-563
0,11	-718	-691	-1003	-298	-677,5
0,13	234	-1093	382	-642	-279,75
0,15	-1600	-642	-1554	357	-859,75
0,17	-105	-367	308	-603	-191,75
0,19	-1618	-1289	-3576	-229	-1678
0,21	235	-337	-218	-1524	-461
0,23	-923	-683	610	-387	-345,75
0,25	-616	-378	-2774	-436	-1051
0,27	-121	-464	-159	138	-151,5
0,29	-965	-1865	198	-460	-773
0,35	-910	-630	91	-357	-451,5
0,45	-792	-498	-74	-348	-428
0,55	-579	-496	-74	-558	-426,75
0,65	-145	-685	-27	-145	-250,5
				Spaltenmittel- wert [MPa]	-693,26

Anhang G: Vergleich der Referenzproben mit den unterschiedlichen Walzkräften in X-Richtung

Messtiefe	Mittelwerte Referenz	Mittelwerte 250 N	Mittelwerte 500 N	Mittelwerte 750 N	Mittelwerte 1000 N
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	1005,75	-629,25	-1214	-828,25	-1350,5
0,03	513	-238	-354,25	-240,5	-260,5
0,05	338,5	-280,75	-235,5	-301,75	-432,5
0,07	298	-372,25	-334,75	-555	-314
0,09	467,5	-338,25	-504,75	-239,75	-303
0,11	60	-412,75	-270,5	-303,25	-47,75
0,13	-61,5	-234,75	-516,5	-200	179,25
0,15	170	-515,5	-171,25	-391	-77,5
0,17	614,75	-173,75	-177	-224,75	-240
0,19	232,75	-266,5	-442	-1088,75	-1758
0,21	497,5	-226,5	-577,25	-358,5	-359,5
0,23	51,25	-442	27	-487,25	-92
0,25	-313,25	-210,25	-227	-543,5	-1284,25
0,27	23	-36,25	-449,25	-457,5	183,25
0,29	257	-65,25	-464	-471,5	-394,75
0,35	423,75	-173,75	-476,25	-519,5	-93,75
0,45	566	94,75	-570,25	-471,25	-323,5
0,55	-247,75	213	-103,75	-365,75	-272
0,65	-87,5	41,25	610,75	-97,5	-203,5

Anhang H: Vergleich der Referenzproben mit den unterschiedlichen Walzkräften in Y-Richtung

Messtiefe	Mittelwerte Referenz	Mittelwerte 250 N	Mittelwerte 500 N	Mittelwerte 750 N	Mittelwerte 1000 N
[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,007	1020,75	-1071,75	-2504,25	-1874,75	-2745,75
0,03	405,75	-369,5	-700,25	-558,25	-505,75
0,05	317,5	-442,75	-452,25	-641,5	-665,5
0,07	251,5	-515,5	-566,25	-805	-666,25
0,09	466,25	-514,75	-681,75	-566	-563
0,11	-32	-501,75	-434	-525,5	-677,5
0,13	-96,5	-445,25	-942	-484,75	-279,75
0,15	102,75	-647,75	-288,75	-947,5	-859,75
0,17	590	-209,75	-261,75	-344,25	-191,75
0,19	214,5	-348,75	-450,5	-1683	-1678
0,21	503,75	-325	-512,5	-447,25	-461
0,23	-75	-716,25	94,25	-700,75	-345,75
0,25	-238,5	-146,75	-158,75	-607,75	-1051
0,27	65,75	-251,5	-598,5	-878,75	-151,5
0,29	251,75	-51	-698,5	-427,5	-773
0,35	426,5	-236,5	-520	-603,75	-451,5
0,45	537	74	-608,5	-476,5	-428
0,55	-189,25	300	-106,75	-364,5	-426,75
0,65	-64,5	135,75	521	-248,75	-250,5

Anhang I: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in X-Richtung

Messtiefe	Spurbreite 0,2 mm	Spurbreite 0,3 mm	Spurbreite 0,4 mm	Spurbreite 0,5 mm	Spurbreite 0,6 mm
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,007	-828,25	-944	-746	-476	-450
0,03	-240,5	-590,5	-250	-188,5	-244
0,05	-301,75	-101,5	-307	-125,5	-288,5
0,07	-555	-170,5	-259	-435	-375
0,09	-239,75	-619,5	-153,5	-74,5	-209
0,11	-303,25	-140	-507,5	-991,5	-318,5
0,13	-200	-629	-184	-286,5	-293
0,15	-391	-513	-258	-0,5	-187
0,17	-224,75	-208,5	-246	-345,5	-60,5
0,19	-1088,75	-671	-419,5	-538	-115,5
0,21	-358,5	-541,5	-434,5	40,5	-494,5
0,23	-487,25	-588,5	-533,5	-258,5	-622
0,25	-543,5	-619,5	-274	-365,5	-351,5
0,27	-457,5	-133	-808,5	-834	-649,5
0,29	-471,5	-864,5	-298,5	302	-533
0,35	-519,5	-446	-603,5	-483	-450,5
0,45	-471,25	-433	-357,5	-398	-258,5
0,55	-365,75	-409	-588,5	-475,5	-464,5
0,65	-97,5	-192	-155,5	-291	-325

Anhang J: Vergleich der unterschiedlichen Spurbreiten in Y-Richtung

Messtiefe	Spurbreite 0,2 mm	Spurbreite 0,3 mm	Spurbreite 0,4 mm	Spurbreite 0,5 mm	Spurbreite 0,6 mm
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,007	-828,25	-1722	-1545	-1240	-1072,5
0,03	-240,5	-559	-443,5	-220	-387
0,05	-301,75	-636	-483,5	-129	-390
0,07	-555	-368	-500	-547	-472
0,09	-239,75	-907,5	-224	-202,5	-352,5
0,11	-303,25	-261	-874	-1087,5	-518
0,13	-200	-866,5	-354,5	-426,5	-458
0,15	-391	-616	-565,5	-273	-393
0,17	-224,75	-260,5	-536	-271,5	-320,5
0,19	-1088,75	-798	-790,5	-541	-368,5
0,21	-358,5	-594	-412,5	-633	-527,5
0,23	-487,25	-716	-753	-256,5	-751
0,25	-543,5	-673	-231	-273	-337,5
0,27	-457,5	-53	-844,5	-586,5	-752,5
0,29	-471,5	-814,5	-551,5	201	-665,5
0,35	-519,5	-523	-658	-507,5	-519,5
0,45	-471,25	-443	-341	-288	-434,5
0,55	-365,75	-384,5	-637	-432,5	-376
0,65	-97,5	-180	-21,5	-197	-299,5

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 14. März 2014

.....

Christian Mannigel